

G
70,45
45
253
2012

**Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke**

**CARACTÉRISATION, MODÉLISATION ET VALIDATION DU TRANSFERT RADIATIF
D'ATMOSPHÈRES NON STANDARD ; IMPACT SUR LES CORRECTIONS
ATMOSPHÉRIQUES D'IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION.**

Shems Zidane

**Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.) en télédétection
Octobre 2012**

© Shems zidane, 2012

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Norm O'Neill, Ph.D., directeur de recherche
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, CANADA

M. Martin Bergeron, Ph.D., codirecteur de recherche
Agence Spatiale Canadienne, Saint-Hubert, CANADA

M. Alain Royer, Ph.D., codirecteur de recherche
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, CANADA

M. Hardy Granberg, Ph.D., examinateur
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, CANADA

M. Martin Aubé, Ph.D., examinateur
Cégep de Sherbrooke, Sherbrooke, CANADA

M. Robert Gauthier, Ph.D., examinateur externe
Centre Canadien de Télédétection, Ottawa, CANADA

La présidence a été assurée par Madame Thérèse Audet, vice-Doyenne aux études supérieures et à la recherche de la faculté des Lettres et Sciences Humaines de L'Université de Sherbrooke.

LA SOUTENANCE PUBLIQUE S'EST TENUE À L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
LE 16 AVRIL 2012

REMERCIEMENTS

Il m'est un agréable devoir de citer toutes les personnes et organismes qui ont permis, par leur contributions financières et intellectuelles à ce projet de thèse de se réaliser. Ainsi, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.

Merci à mes codirecteurs de thèse, Alain Royer et Martin Bergeron, et aux autres membres du jury pour avoir pris part à ce projet de doctorat et qui ont évalué cette thèse. Vos conseils et recommandations ont été de précieux outils afin d'améliorer la qualité de ce travail. Je vous remercie pour vos commentaires éclairée.

Mes remerciement vont également aux personnes du projet GÉOIDE qui ont participé et contribué aux premières années de ce projet ainsi qu'au Professeur John Miller et à Jim Freemantle pour son soutien technique dans l'acquisition et l'exploitation des données de la campagne de mesure.

Merci encore aux membres d'Agriculture CANADA, et à l'équipe mobilisée pour la campagne de terrain de juillet 2004 à Saint-Jean-sur-Richelieu qui ont permis l'acquisition de ces précieuses données.

Un sincère salut à toute l'équipe du CARTEL, en particulier à Patrick Cliche, qui a toujours eu une oreille attentive pour mes questions techniques. Merci aussi à mes amis et camarades: Servet, Mehmet, Ovidiu, Kostya, Yves, Matthieu, Gregory...et j'en oublie certainement bien d'autres qui ont su rendre agréable ces longues années passées au département tout en m'aidant, à l'occasion, dans mes travaux.

Un immense merci ira aussi à mon directeur de thèse Monsieur Norm O'Neill, qui m'a non seulement soutenu financièrement et scientifiquement pendant toutes ces années mais dont le soutien a largement dépassé le cadre académique. Sans ce généreux épaullement je pense que je n'aurais pas eu la chance de pouvoir finaliser ce projet. J'en profiterais pour saluer chaleureusement d'ailleurs sa conjointe, Gladys.

J'ai une pensée particulière pour mes parents, Micheline et Charef, qui ont été constamment présent et d'un soutien indéfectible et discret et qui m'ont fait l'honneur de venir assister à ma soutenance ; merci d'ailleurs à mon ami de toujours, Alban, qui a aussi traversé l'océan pour cette occasion.

Merci à tous.

Résumé

Cette étude est basée sur des données multi-altitudes aéroportées acquises en juillet 2004 lors d'un événement atmosphérique inhabituel dans la région de Saint-Jean-sur-Richelieu. Nous entendons en cela une atmosphère dont la distribution des aérosols ne respecte pas les variations habituellement implémentée dans les codes de transfert radiatifs. Les surfaces au sol imagées pendant cette campagne de terrain couvraient une variété spectrale assez diversifiée, à savoir des surfaces agricoles, des plans d'eau et des zones urbaines et forestières. L'aspect multi-altitude de cette acquisition de données a permis de caractériser les mêmes cibles au sol avec des contributions de l'atmosphère variant en fonction de l'altitude considérée afin de caractériser au mieux la perturbation observée durant cette campagne et de permettre une meilleure caractérisation de la perturbation apportée par une variation non-standard (panache de fumée). La transformation de la luminance apparente aux trois altitudes en réflectance apparente et l'implémentation de la perturbation apportée par le panache de fumée dans un modèle classique a permis une correction atmosphérique appliquée aux deux altitudes les plus hautes. Les résultats ont démontré une cohérence avec les réflectances apparentes de validation qui confirmait la véracité de notre modélisation du cas non-standard. Ces résultats ont d'autant plus été pertinents pour la plus haute altitude de 3,17km : la réflectance apparente à cette altitude est au dessus de la majeure partie du panache de fumée et intègre une bonne proportion de la perturbation apportée par ce panache, ce qui représente un test probant de notre capacité à corriger adéquatement l'influence de cette perturbation.

Les perturbations atmosphériques standard sont évidemment prises en compte dans la majorité des modèles atmosphériques, mais ceux-ci sont souvent basés sur des variations monotones des caractéristiques physiques de l'atmosphère avec l'altitude. Lorsque la radiation atmosphérique est perturbée, par un panache de fumée ou un événement de pollution atmosphérique local et non standard, cela nécessite une modélisation et une modification adéquate des modèles existants en fonction des paramètres que l'on pourra obtenir sur ladite perturbation. Les intrants principaux de cette étude étaient ceux normalement utilisés lors d'une correction atmosphérique classique à savoir les luminances apparentes mesurées par un imageur aéroporté mais à trois altitudes différentes et l'épaisseur optique des aérosols (AOD) qui était acquise depuis le sol. La méthodologie que nous avons employé utilise aussi un code de transfert radiatif (CAM5S, pour Canadian Modified 5S, qui vient directement du code de transfert radiatif 5S dans le visible et proche infrarouge). Cependant il nous faudra aussi avoir

recours à d'autres paramètres et données afin de modéliser correctement la situation atmosphérique particulière présente sur les images multi-altitude acquises pendant la campagne de terrain à Saint-Jean-sur-Richelieu.

Nous avons alors élaboré un protocole de modélisation de perturbation atmosphérique non standard où une gamme de données auxiliaires disponibles est venue compléter nos données principales. Cela a permis l'élaboration d'une méthodologie robuste et relativement simple adaptée à notre problématique. Ces données auxiliaires, à savoir des données météorologiques, des profils LIDAR, différentes images satellites et des données de photomètres solaires qui ont permis la détermination de la fonction de phase des aérosols, ont été suffisantes pour établir une modélisation adéquate du panache de fumée observé en terme de distribution verticale non monotone des paramètres physiques relevés lors de cette campagne. Cette distribution non-standard a été par la suite interprétée en terme de profil spécifique de l'AOD qui a remplacé les profils des AOD employés dans le modèle de correction atmosphérique CAM5S.

En fonction de cette modélisation, nous montrons que l'erreur entre les réflectances apparentes au sol obtenu par le processus de correction atmosphérique et les réflectances apparentes au sol provenant du processus de validation $dR^*(0)$, moyenné quadratiquement à travers les bandes visibles, reste majoritairement dans une gamme inférieure à 0,01 d'erreur quadratique moyenne des $R^*(0)$ après avoir modélisé la perturbation non-standard, ce qui permet une estimation plus acceptable des réflectances multi-altitude et du biais existant entre la prise en compte et la non prise en compte de cette perturbation dans le modèle atmosphérique.

D'importants écarts ont néanmoins été observés, majoritairement attribuables à la difficulté apportée par les conditions d'acquisition, les grandes disparités observées entre l'échantillonnage des mêmes surfaces aux trois altitudes, et probablement des erreurs de modélisation et/ou de calibration. La nécessité d'améliorer le processus d'acquisition, de modélisation et de prévision de telle perturbation est largement décrit dans ce document afin de permettre à l'avenir d'établir un protocole d'acquisition plus adapté grâce notamment à une surveillance et un suivi des perturbations atmosphériques maintenant possible grâce aux outils décrits.

L'originalité de cette étude réside dans une nouvelle approche de la caractérisation de ces perturbations atmosphériques par l'incorporation d'une structure non standard dans un modèle de correction atmosphérique opérationnel et de démontrer que cette approche présente des améliorations significatives des résultats par rapport à une approche qui ignore la perturbation du profil vertical standard tout en utilisant des valeurs d'AOD totaux correctement mesurés. Le modèle de profil que nous avons employé

était simple et robuste, mais a capturé suffisamment de caractéristiques du panache pour réaliser des améliorations significatives en termes de précision de correction atmosphérique. Le processus global d'aborder tous les problèmes rencontrés dans l'analyse de notre perturbation des aérosols nous a aidé à construire une méthodologie appropriée pour caractériser ces événements sur la base de la disponibilité des données, distribué gratuitement et accessibles à la communauté scientifique. Cela rend cette étude adaptable et exportable à d'autres problématiques du même genre.

mots-clés: perturbation atmosphérique non standard, luminances apparente multi-altitude, panache de fumée, modélisation de panache gaussien, ajustement de luminance, AOD, CASI

Abstract

This study is based on data acquired with an airborne multi-altitude sensor on July 2004 during a non-standard atmospheric event in the region of Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec. By non-standard atmospheric event we mean an aerosol atmosphere that does not obey the typical monotonic, scale height variation employed in virtually all atmospheric correction codes. The surfaces imaged during this field campaign included a diverse variety of targets : agricultural land, water bodies, urban areas and forests. The multi-altitude approach employed in this campaign allowed us to better understand the altitude dependent influence of the atmosphere over the array of ground targets and thus to better characterize the perturbation induced by a non-standard (smoke) plume. The transformation of the apparent radiance at 3 different altitudes into apparent reflectance and the insertion of the plume optics into an atmospheric correction model permitted an atmospheric correction of the apparent reflectance at the two higher altitudes. The results showed consistency with the apparent validation reflectances derived from the lowest altitude radiances. This approach effectively confirmed the accuracy of our non-standard atmospheric correction approach. This test was particularly relevant at the highest altitude of 3.17 km : the apparent reflectances at this altitude were above most of the plume and therefore represented a good test of our ability to adequately correct for the influence of the perturbation.

Standard atmospheric disturbances are obviously taken into account in most atmospheric correction models, but these are based on monotonically decreasing aerosol variations with increasing altitude. When the atmospheric radiation is affected by a plume or a local, non-standard pollution event, one must adapt the existing models to the radiative transfer constraints of the local perturbation and to the reality of the measurable parameters available for ingestion into the model. The main inputs of this study were those normally used in an atmospheric correction : apparent at-sensor radiance and the aerosol optical depth (AOD) acquired using ground-based sunphotometry. The procedure we employed made use of a standard atmospheric correction code (CAM5S, for Canadian Modified 5S, which comes from the 5S radiative transfer model in the visible and near infrared) : however, we also used other parameters and data to adapt and correctly model the special atmospheric situation which affected the multi-altitude images acquired during the St. Jean field campaign.

We then developed a modeling protocol for these atmospheric perturbations where auxiliary data was employed to complement our main data-set. This allowed for the development of a robust and simple methodology adapted to this atmospheric situation. The auxiliary data, i.e. meteorological data, LIDAR profiles, various satellite images and sun photometer retrievals of the scattering phase function, were

sufficient to accurately model the observed plume in terms of a unusual, vertical distribution. This distribution was transformed into an aerosol optical depth profile that replaced the standard aerosol optical depth profile employed in the CAM5S atmospheric correction model.

Based on this model, a comparison between the apparent ground reflectances obtained after atmospheric corrections and validation values of $R^*(0)$ obtained from the lowest altitude data showed that the error between the two was less than 0.01 rms. This correction was shown to be a significantly better estimation of the surface reflectance than that obtained using the atmospheric correction model.

Significant differences were nevertheless observed in the non-standard solution : these were mainly caused by the difficulties brought about by the acquisition conditions, significant disparities attributable to inconsistencies in the co-sampling / co-registration of different targets from three different altitudes, and possibly modeling errors and / or calibration. There is accordingly room for improvement in our approach to dealing with such conditions. The modeling and forecasting of such a disturbance is explicitly described in this document: our goal in so doing is to permit the establishment of a better protocol for the acquisition of more suitable supporting data.

The originality of this study stems from a new approach for incorporating a plume structure into an operational atmospheric correction model and then demonstrating that the approach was a significant improvement over an approach that ignored the perturbations in the vertical profile while employing the correct overall AOD. The profile model we employed was simple and robust but captured sufficient plume detail to achieve significant improvements in atmospheric correction accuracy. The overall process of addressing all the problems encountered in the analysis of our aerosol perturbation helped us to build an appropriate methodology for characterizing such events based on data availability, distributed freely and accessible to the scientific community. This makes our study adaptable and exportable to other types of non-standard atmospheric events.

Keywords : non-standard atmospheric perturbation, multi-altitude apparent radiances, smoke plume, Gaussian plume modelization, radiance fit, AOD, CASI

Table des matières

1.Introduction, problématique et hypothèse de recherche.....	1
1.1.Introduction.....	1
1.2.Problématique.....	5
1.2.1.Présence assez fréquente d'atmosphères non-standard.....	7
1.2.2.Le problème des atmosphères non standard.....	8
1.2.3.Protocole de traitement dans le cas d'atmosphères non-standard.....	11
1.2.3.1 Processus d'extraction de $R^*(0)$ par la modélisation du transfert radiatif non standard:	
.....	13
1.2.3.2 Correction atmosphérique standard et non standard:.....	13
1.3.Hypothèse de recherche.....	13
1.4.Objectifs de la recherche.....	14
1.4.1.Objectifs généraux.....	14
1.4.2.Objectifs spécifiques.....	15
2.Méthodologie.....	15
2.1.Méthodologie générale.....	16
2.2.Caractérisation du panache.....	17
3.Description du site d'étude et des données.....	18
3.1.Description du site d'étude.....	18
3.2.Données principales.....	20
3.2.1.Images hyperspectrales aéroportées CASI:.....	20
3.2.2.Données Microtops.....	27
3.3.Modèle utilisés et modélisation principale.....	30
3.3.1.Modèle CAM5S.....	30
3.4.Données complémentaires.....	31
3.4.1.Imagerie satellite MODIS	31
3.4.1.1Imagerie MODIS standard.....	31
3.4.1.2Produit connexes aux images MODIS:.....	33
3.4.2.Modèle HYSPLIT et données météorologiques.....	36
3.4.2.1Modèle Lagrangien de trajectoire d'une particule atmosphérique.....	36
3.4.3.Données LIDAR du réseau NOAA CREST	38
3.4.4.Données du réseau AEROCAN	39
3.4.5.Données multi-angulaires MISR	41

4. Analyse et résultats, Modélisation verticale du panache.....	43
4.1. Interprétation des mesures du Microtops.....	45
4.1.1. Détermination de l'AOD de fond.....	45
4.1.2. Extrapolation des mesures Microtops pour 550nm.....	46
4.2. Modélisation du panache dans CAM5S.....	49
4.3. Considération sur la détermination de l'AOD du panache :.....	55
4.3.1. Utilisation du modèle d'aérosols Biomass Burning de CAM5S.....	56
5. Résultats	60
5.1. Première étude sur une cible test, la cible V11.....	61
5.2. Estimation et test de la réflectance apparente de validation avec la cible test V11.....	61
5.3. Estimation de l'erreur $d^*R(0)$ pour la cible V11.....	66
5.4. Généralisation des résultats.....	68
5.4.1. Erreur majeure pour les trois dernières bandes du proche-infrarouge:.....	74
5.4.2. Erreur importante pour la première bande dans le bleu :.....	75
5.4.3. Comportement de l'erreur pour les cibles claires, et sombres pour les bandes dans le visible :.....	76
5.4.4. Considération sur la fonction de phase utilisée:.....	77
6. Discussions.....	79
7. Conclusions et recommandations.....	80
8. Références.....	82

Liste des figures

Figure 1.1 - FRB multi-altitude acquises au dessus d'une végétation dense sombre (épinette noire) lors de la campagne de terrain BOREAS 1994 (d'après Zagolski et al. 1999).	9
Figure 1.2 - Luminances apparentes extraites des images CASI pour une cible végétale à comparer avec Zagolski, 1999. En dehors de l'échantillonnage différent (7 bandes CASI) l'évolution des réflectances apparentes aux altitudes pour une cible de même type (couvert végétal) n'est pas similaire à celles montrées dans la figure 1.1 pour les trois dernières bandes CASI.....	11
Figure 2.1 - Organigramme méthodologique général.....	16
Figure 3.1 - Zone d'étude de Saint-Jean-sur Richelieu. Composition colorée Landsat du 26/07/04 à 15:21 UT [R=bande7 (2090-2350nm) V=bande4 (750-900nm) B=bande2 (525-605nm)] et superposition des 3 trajets CASI. La flèche en blanc indique la direction de vol de l'avion durant l'acquisition pour les trois altitudes.....	20

Figure 3.2 - Schématisation des trois survols CASI.....	22
Figure 3.3 - superposition des 3 altitudes CASI (3,17 1,59 et 0,67km) et sélection des cibles au sol représentant les trois survols découpé en 3 sections de l'ouest à l'est pour des commodités d'affichage; (Composition colorée: R:bande 3, V:bande 2, B:bande 1). Le code couleur pour le tracé des spectres correspondant aux altitudes sera respectivement: bleu, vert et rouge pour les altitudes de 0,67, 1,52 et 3,17km.....	24
Figure 3.4 - Test d'homogénéité des cibles (dispersion des valeurs et écarts-types), Histogramme de la bande CASI à 671 nm (bande 3) pour les 3 aires (A,B,C) représentées et les 3 altitudes. Les valeurs en abscisse sont en luminance * 100 (W.m-2.Sr-1.µm-1*100). Les nombres de pixels correspondant aux différentes aires sont les suivants: A3,17km= 1513, B3,17km=560, C3,17km= 212; A1,59km=3452, B1,59km=1673, C1,59km= 847; A0,67km=10494, B0,67km=4673, C0,67km= 1204.....	25
Figure 3.5 -Différence de géométrie d'acquisition entre Microtops et CASI à Saint-Jean-sur-Richelieu à 21:09 UT, heure de la plus basse altitude.....	28
Figure 3.6 - Mesures MICROTOPS du 20 juillet 2004.....	29
Figure 3.7 - Scène MODIS Terra du 20 juillet 2004 à 15h40. Vue générale de la zone en composition colorée des bandes (7 2 et 1): imagerie A; et en couleur vraie (bandes 1, 4 et 3): imagerie B . L'imagerie C est un zoom de la scène en couleur vraie sur le panache; on visualise bien le panache arriver sur la zone d'étude (Saint-Jean-sur-Richelieu est indiqué par une étoile sur l'imagerie C).....	32
Figure 3.8 - Estimation de l'AOD à 550nm et visualisation du panache à partir de la scène MODIS Terra du 20 juillet 2004 à 15h40 UT soit près de 5 heures avant les acquisitions CASI, Saint-Jean-sur Richelieu est indiqué par une étoile. On retrouve bien le panache de fort AOD visualisé sur la scène MODIS de la figure 3.7 qui se déplace vers le Nord Est. (source: U.S. Air Quality Web Blog, UMBC. données publiées par Donna Mc Namara et Ana Prados (NOAA/NESDIS).....	34
Figure 3.9 - Cartographie des hotspots obtenus avec le capteur MODIS pour la période du 19 au 28 juillet 2004 au niveau de l'Alaska et du Canada. Cette image recense les feux actifs pendant cette période suffisamment détectable par le satellite. (source: Nasa.gov, Global Fire Maps, NASA Earth data).....	35
Figure 3.10 - Estimation du temps de passage du panache sur notre zone d'étude à l'aide d'une simulation HYSPLIT.....	37
Figure 3.11 - Profil LIDAR vertical du 18 juillet 2004 (12-24h) acquis à L'université du Wisconsin (Madison) (source: NOAA CREST).....	39
Figure 3.12 - les AODs relevées avec le photomètre CIMEL de Sherbrooke le 20 juillet 2004 pour les canaux 380, 500 et 870 nm. Les données suivantes sont de niveau 1,0 c'est-à-dire qu'elle sont non-	

vérifiées et non filtrées (des données perturbées par les nuages par exemple) et n'ont pas reçu de calibration finale.....	40
Figure 3.13 - intercalibration du 27 février 2004 entre le Photomètre CIMEL de Shebrooke et le Microtops utilisé à Saint-Jean-sur-Richelieu.....	41
Figure 3.14 - Détermination de l'altitude du panache de fumée sur l'image MISR du 19 juillet 2004. L'image correspond à une sous-image sous la bande de nuage vue dans l'image MISR générale représentée sur la scène MODIS ci-contre.....	43
Figure 4.1 - Données Microtops et CIMEL du 20 juillet 2004 et simulation HYSPLIT	45
Figure 4.2 - Profils des AOD versus lambda pour les 3 altitudes CASI.....	48
Figure 4.3 - 2 simulations HYSPLIT pour retracer le panache sur la scène MISR du 19 juillet et l'image LIDAR du 18 juillet. (Source web HYSPLIT).....	51
Figure 4.4 - Extraction d'altitude sur la scène MISR du 19 juillet 2004.....	52
Figure 4.5 - Profil LIDAR du panache (coefficient d'extinction en $\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$) relevé à Baltimore le 20 juillet 2004 (source: U.S. Air Quality Web Blog, UMBC). À droite, schématisation du panache gaussien correspondant à la perturbation imagée.	53
Figure 4.6 - Simulations HYSPLIT pour le 20 juillet 2004 à 20h00 et pour 6 jours en arrière pour Baltimore et saint-Jean-sur-Richelieu pour deux particules situées à 3 et 4 km d'altitude. (Source web HYSPLIT).....	54
Figure 4.7 - profil du panache constitué de deux gaussiennes en terme d'AOD et du coefficient d'extinction N correspondant.....	55
Figure 4.8 - Caractéristiques des modèles d'aérosols implémentés dans 6S (source: manuel 6S). L'albédo de simple diffusion n'a pas d'unité tandis que les unités du coefficient d'extinction sont en km^{-1} . Ce dernier paramètre est fonction de la densité numérique des particules : on a utilisé des densités numériques standard de CAM5S illustrées au tableau 4.3 pour produire le graphique à droite.....	57
Figure 4.9 - Fonction de phase des aérosols pour 2 modèles d'aérosols (Continental, Biomasse brûlée) simulé avec CAM5S pour la bande 440nm comparée au calcul de fonction de phase issue des données CIMEL de Sherbrooke pour cette même bande.....	60
Figure 5.1 - $R^*(0)$ résultant de la correction atmosphérique appliquée aux luminances apparentes de l'altitude de 0.667 km au dessus de la cible V11 pour les 6 panaches du tableau 5.1 et pour un AOD de 1,25 à 550nm.....	62
Figure 5.2 - Même analyse de variation de $R^*(0)$ que la figure 5.1 mais pour une variation de l' AOD mesuré à 550 nm dans le cas non-standard (avec panache de fumée).	64
Figure 5.3 - ajustement des réflectances apparentes pour l'altitude de 1,59km et à gauche pour 3,17km	

avec le modèle CAM5S tenant compte de la modélisation du panache.....	65
Figure 5.4 - Comparaison entre correction atmosphérique standard et celle non-standard tenant compte de la modélisation du panache.....	67
Figure 5.5 - résultats des erreurs moyennes pour les modèles standard et non-standard pour les 18 cibles, un panache constant (panache 1) et des AODs aux altitudes constantes (valeurs du Microtops). Les erreurs sont calculées sur toutes les 7 bandes du CASI.....	69
Figure 5.6 - Erreur moyenne pour les 7 bandes CASI et les 18 cibles sélectionnées (cas non-standard).	71
Figure 5.7 - Erreur moyenne pour les 7 bandes CASI et les 18 cibles sélectionnées (cas standard).....	72
Figure 5.8 - erreur quadratique moyenne des 18 cibles limitée aux bandes 2,3 et 4 du CASI dans le cas standard et non-standard.....	73
Figure 5.9 - Comparaison de la réflectance de la surface ETM + avec des mesures au sol (ASD) pour une parcelle d'herbe jaune (d'après Vermote et al., 2002).....	74
Figure 5.10 - Erreur $dR^*(0)$ pour la bande 1 dans le cas standard et non-standard pour les 18 cibles, on fait apparaître en bleu la valeur de $R^*(0)$ validation.....	75
Figure 5.11 - fonction de phase pour le modèle Biomass Burning implémenté dans CAM5S.....	77
Figure 5.12 - différences observées entre les deux différentes fonctions de phase (continental et Biomass Burning) pour les erreurs entre modèles standard et non-standard ainsi qu'avec la réflectance apparente de validation obtenue.....	78

Liste des tableaux

Tableau 3.1 - bandes spectrales des images CASI.....	20
Tableau 3.2 - Caractéristiques des images CASI.....	21
Tableau 3.3 - Statistiques d'une cible végétale commune aux trois altitudes. Cas de l'aire "A" de la figure 3.4.....	26
Tableau 3.4 - Bandes spectrales du Microtops.....	29
Tableau 3.5 - Caractéristiques principales des données MISR.....	42
Tableau 4.1 - Extraction de la valeur des AOD à 550 nm pour le 20 juillet 2004 aux heures de survol du CASI	47
Tableau 4.2 - caractéristique du panache.....	54
Tableau 4.3: composition des modèles d'aérosols d'après Vermote et al., 1997. N_j , la densité de particules, est paramétré de telle manière qu'elle égale le coefficient d'extinction à 550 nm	58
Tableau 5.1 - caractéristique des 6 panaches gaussiens. L'étiquette "%age relatif" fait allusion à la	

fraction de l'AOD total (du panache total) représentée par chaque sous-panache du profil bi-modal ...	61
Tableau 5.2-Tabulations des $R^*(0)$ de la figure 5.1.....	63
Tableau 5.3: caractéristiques du Panache sélectionné pour le fit de la cible V11.....	65
Tableau 5.4: Différences entre réflectances au sol	66
Tableau 8.1 - Deux cas de situation atmosphérique pour l'étude des fits de luminance.....	97
Tableau 8.2: valeur de $R^*(0)$ obtenue par régression multi-altitude.....	102
Tableau 8.3: Valeurs de réflectance apparente pour la cible V11 pour les deux configurations de CAM5S.....	103

Liste des annexes

Annexe 1 - Modélisation d'un panache gaussien à l'aide de la Fonction d'erreur.....	89
Annexe 2 - Simulations HYSPLIT.....	91
Annexe 3 - Corrections géométriques sur nos images CASI.....	92
Annexe 4 - Autre considération sur cette étude, ajustement des Luminances apparentes, Normalisation des luminances, régression multi-altitude des luminances normalisées et comparaison des erreurs entre régression et RTM standard et non standard.....	95
Annexe 5 - Modélisation de la double Gaussienne dans CAM5S -codage.....	105
Annexe 6 - Considérations techniques sur le fonctionnement de CAM5S et les entrées standard du modèle.....	106
Annexe 7 - Comparaison entre correction atmosphérique standard et celle non-standard tenant compte de la modélisation du panache pour les 18 cibles choisies.....	109

Glossaire

5S: Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

6S: Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

AERONET: Aerosol Robotic Network

AEROCAN: Aerosol Robotic Network in CANADA (fait partie du plus global AERONET)

AOD: Aerosol Optical Depth

AOT: Aerosol Optical Thickness

BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function

CAM5S: Canadian Modified 5S

CASI: Compact Airborne Spectrographic Imager

CREST: Cooperative Remote Sensing and Technology Center

FLAMBE: Fire Locating and Modeling of Burning Emissions

FRB: Fonction de Réflectance Bidirectionnelle

GASP: Goes Aerosol Smoke Product

GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite

HYSPLIT: Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model

LANDSAT: Land sensing Satellite

LIDAR: Light Detection and Ranging

MISR: Multi-angle Imaging Spectroradiometer

MINX: MISR interactive explorer

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

SRA model: Standard Radiation Atmosphere model

$R^*(0)$: réflectance apparente au sol

$R^*(z)$: réflectance apparente à l'altitude z

$R^*(0)_{validation}$: réflectance apparente au sol de validation

$R^*(0)_{standard}$: réflectance apparente au sol obtenue avec un SRA standard

$R^*(0)_{non-standard}$: réflectance apparente au sol obtenue avec un SRA modifié

UT: Universal Time

1. Introduction, problématique et hypothèse de recherche

1.1. Introduction

La correction atmosphérique des données satellitaire acquise dans le domaine du visible et du proche infrarouge (VIS/PIR) est toujours problématique du fait des fortes perturbations atmosphériques présentes dans cette région du spectre électromagnétique entre la cible et le capteur (Vermote et al., 1997). Ces perturbations vont modifier les spectres des cibles à la surface qu'un capteur satellitaire ou aéroporté va mesurer. Plusieurs méthodes de correction de ces effets atmosphériques sont utilisées pour rendre exploitable les données de télédétection dans ce domaine spectral (Coll et al., 2010 ;Zagolski et Gastellu-Etchegorry, 1995 ;Chavez, 1996). Les deux principales méthodes sont le recours à des modélisations des effets atmosphériques et les relevés de terrain effectués au sol pendant l'acquisition des images. L'utilisation de modèles constitue le moyen le plus généralisé pour effectuer ces corrections et le plus approprié pour fournir une chaîne de traitement opérationnelle, ces modèles flexibles ne sont pas limités sur une zone d'étude spécifique, ou de type de cible au sol, fournissant aux chercheurs une plus grande flexibilité pour la simulation des paramètres atmosphériques (Zhao et al., 2000). La deuxième méthode est strictement empirique et implique, par exemple, des mesures au sol de réflectance synchronisées avec le temps d'acquisition de l'image à corriger. On citera la calibration par la méthode de la ligne empirique (Jensen, 2005 ;Smith et Milton, 1999). La mesure simultanée prise au sol quand à elle agit aussi comme source de validation mais trop épisodique pour faire partie d'une chaîne de traitement opérationnelle de la donnée.

L'étude des interactions atmosphériques dans le VIS/PIR a donc permis l'avènement de modèles de transfert radiatif qui permettent de mieux appréhender tout une gamme d'atmosphère terrestre standard. Les capteurs à résolution spectrale plus fine (les capteurs hyperspectraux) ont permis justement une étude plus détaillée des surfaces imagées, et simultanément l'atmosphère apporte une perturbation plus conséquente au signal perçu dans certaines longueurs d'ondes (aux longueurs d'onde qui correspondaient à des raies d'absorption moléculaire). Les capteurs hyperspectraux sont des outils de diagnostic et de surveillance plus pertinents du fait de la richesse de leur contenu spectral, ils sont donc plus performants pour caractériser l'interaction du signal capté avec l'atmosphère que les capteurs satellitaires habituels. Le contenu en information présenté par les spectres en continu qui proviennent des capteurs hyperspectraux est un avantage dans notre étude car ils pourront mettre en évidence de façon plus détaillée les effets atmosphériques. Cette information spectrale plus conséquente incitera à

adapter les modèles atmosphériques existants voire utiliser des modèles plus sophistiqués. L'utilisation de ces modèles qui sont basés sur des paramètres absolus de radiation implique des approches précises de calibration absolue afin d'améliorer la qualité des corrections atmosphériques. Les données hyperspectrales, comme toute donnée spectrale donnant de l'information sur la cible imagée et son interaction avec l'atmosphère s'avèrent complémentaires aux mesures des paramètres atmosphériques afin de modéliser la situation atmosphérique présente sur le terrain lors de la prise de mesure.

La télédétection de la surface terrestre à partir de plateformes satellites ou aéroportées dans le visible et proche infrarouge permet d'imager les surfaces en recevant de manière passive un signal fortement affectée par la présence de l'atmosphère sur le trajet du rayonnement (à savoir soleil à cible et cible à capteur). Ce sont généralement des capteurs passifs qui reçoivent le signal émis par la surface, c'est à dire la lumière solaire réfléchiée sans émission de signal incident, contrairement aux capteurs actifs.

Ce signal dépend donc de la réflectance de la surface et des perturbations apportées par deux phénomènes atmosphériques majeurs dans le spectre solaire qui sont la diffusion et l'absorption.

L'absorption des gaz et la diffusion par les molécules, les aérosols, et les particules nuageuses. Dans un cas idéal sans atmosphère, le rayonnement solaire illumine la surface et si une partie des photons incidents est absorbée par la surface, l'autre fraction restante est réfléchiée vers l'espace et le rayonnement mesuré par un capteur dépendrait directement des propriétés de la surface pour les conditions de visée et d'illumination donnée. Ce signal (la réflectance apparente de la cible) caractérise la surface réelle et c'est celui que nous voulons obtenir dans les cas réels après correction atmosphérique. La diffusion et l'absorption des particules en suspension dans l'atmosphère, c'est-à-dire des molécules, des aérosols et des particules des nuages apportent différentes contributions qu'il faut donc caractériser. La diffusion par les molécules d'air par exemple est très constante dans le temps et se trouve spectralement sélective. Un certain nombre de raies d'absorption par les molécules atmosphériques peuvent être aussi largement évitées sauf dans le cas de certains constituants (comme l'ozone et le dioxyde d'azote). Enfin, les aérosols (particules de taille située entre 0.01 à 10 μm) et les particules nuageuses (particules de 10 à quelques centaines de μm) seront les contributions problématiques majeures à caractériser car elles sont très variables.

L'influence optique des particules à un point donné dans l'atmosphère est représentée par des coefficients de diffusion et d'absorption (voir, par exemple, Chandrasekhar, 1960). Leur influence sur un trajet vertical à travers l'atmosphère est représenté par des épaisseurs optiques de diffusion et

d'absorption. La variabilité du taux d'aérosols nécessite le plus souvent le recours à la mesure de l'épaisseur optique des aérosols ou AOD (Aerosol Optical Depth) qui contribuera aux principaux intrants des modèles atmosphériques (Vermote et al., 1997). La distribution verticale de la concentration et de la taille des aérosols joue un rôle important dans le transfert radiatif du rayonnement solaire. Les modèles de transfert radiatif utilisent typiquement des distributions standard qui sont basées sur des climatologies des aérosols qui caractérisent une région quelconque. Néanmoins des événements atmosphériques occasionnels et non standard pourront se traduire par des taux d'AOD élevés et une distribution spatiale souvent non implémentée dans les modèles. Des tels événements sont problématiques lorsqu'ils surviennent. C'est ce qui arrive par exemple lorsque les données contiennent un panache de feux de forêts assez dense, une situation malheureusement assez commune au Canada durant la saison estivale. Il faut être capable de maîtriser ces situations atmosphériques et les prendre en compte dans les modèles d'atmosphères existants afin que les images résultantes des corrections atmosphériques et les produits de télédétection issus de ces images restent cohérents avec la réalité et soient exploitables.

La problématique de ce sujet traite justement de la possibilité de valider et vérifier la correction atmosphérique dans le cas de situations typiques et atypiques. Son objectif vise donc à valider la qualité des corrections atmosphériques dans des conditions non standard. Nous traiterons du transfert radiatif terrestre dans le VIS/PIR en cas d'événements turbides non-standard et plus spécifiquement des perturbations occasionnelles tel que les panaches de fumée. Dans un premier temps les principales quantités physiques qui nous serviront d'observables seront des luminances apparentes obtenues avec un capteur passif hyperspectral et des mesures d'AOD pour respectivement caractériser les cibles au sol et les conditions atmosphériques dans le cas d'une atmosphère standard. Ces intrants, à présent simples à obtenir (après des années de mise au point des méthodologies de mesure), vont permettre de garder une philosophie assez proche d'une correction standard et garder une perspective de caractérisation et d'étude rapide et opérationnelle. Le cas d'une atmosphère non standard sera abordé en termes d'une approche perturbatrice appliquée au modèle de transfert radiatif standard. La perturbation non homogène (non standard) que nous étudierons sera un panache de feu de forêt présent sur des données provenant d'un site Québécois proche de Saint-Jean-sur-Richelieu (Montérégie). Cette recherche va se baser sur des données VIS/PIR d'un capteur hyperspectral Canadien, le CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager). Le CASI, qui est un capteur aéroporté, va permettre, par des acquisitions à haute altitude avoisinant dans notre cas les 3,17 km, de modéliser des capteurs satellitaires (une altitude

qui est optiquement large en terme de l'influence des aérosols qui sont typiquement concentrés dans les premiers km de l'atmosphère). En effet, l'altitude optiquement élevée et la haute résolution spectrale va permettre par intégration spectrale, de modéliser les bandes spectrales plus larges des capteurs satellitaires existant et/ou futurs. La pertinence de ce projet réside dans le fait que de multiples trajets de la même zone pris à des altitudes différentes vont servir à l'analyse et caractérisation de la perturbation présente sur les images. Pendant l'acquisition, des relevés d'AOD ont été effectués au sol pour permettre la caractérisation atmosphérique.

Cette recherche est motivée aussi par les lacunes existantes dans l'étude des modèles atmosphériques dans des situations atmosphériques de feux de forêt. La correction atmosphérique apportée pose un problème sur sa validation. L'estimation de l'erreur d'un modèle sera toujours une fonction de la modélisation correcte de ce modèle, et cette erreur sera dépendante de la complexité et l'exactitude de sa formulation physique. Pour vérifier l'exactitude d'une correction il faut entreprendre une validation de cette correction.

La validation doit être réalisée selon une méthode indépendante du processus de correction que nous voulons étudier ce qui permettra une critique autonome des résultats. L'objectif est de parvenir à un système de traitement opérationnel de l'estimation de la qualité de la donnée traitée par l'ajustement et la modélisation d'événements atmosphériques non standard qui pourront contribuer à terme à la création d'un modèle d'erreur. Ce modèle pouvant être un produit standard comme une image de réflectance ou une image d'un produit géophysique (Bergeron, 2005). Une campagne d'acquisition a pu être effectuée sur un site d'étude aux surfaces hétérogènes. Ceci a permis la caractérisation de multiples cibles au sol afin d'analyser et de documenter la validation des corrections atmosphériques. Il sera alors possible de comprendre les conséquences d'une atmosphère atypique sur les prévisions du modèle de transfert radiatif qui sert de noyau au processus de corrections atmosphériques. Dans un premier temps la non-prise en compte de la perturbation montrera déjà un biais important dans le résultat final d'une correction avec un modèle standard. Ainsi, le modèle physique reste un modèle standard auquel vient se rajouter une perturbation. Dans un sens plus généralisé on vise à valider un modèle d'erreur à partir d'un ensemble de données prises dans une variété de conditions atmosphériques et de cibles au sol.

1.2. Problématique

Dans un contexte général notre sujet porte sur les corrections atmosphériques des images de télédétection ayant recours à un modèle atmosphérique. La correction atmosphérique est une nécessité dès lors que l'on doit obtenir la valeur du FRB (fonction de réflectance bi-directionnelle) des surfaces imagées par le capteur. Le signal perçu au capteur est un mélange de plusieurs contributions dues en grande partie à l'atmosphère. Une modélisation appropriée de ces propriétés physiques de l'atmosphère va permettre alors de considérer adéquatement la perturbation apportée afin de générer des images non affectées par l'atmosphère et d'obtenir des valeurs de pixels provenant uniquement de la source (i.e. de la surface imagée). La fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF) décrit la diffusion d'un faisceau parallèle de lumière incidente à partir d'une direction dans l'hémisphère supérieur (demi-espace supérieur correspondant à tout l'espace correspondant à celui situé au dessus de la surface étudiée) vers une autre direction de celui-ci. La BRDF est utilisée pour caractériser les surfaces dans la littérature depuis une cinquantaine d'année (Nicodemus, 1977). La BRDF décrivant les propriétés de réflectance intrinsèques d'une surface facilite ainsi la déduction de beaucoup d'autres quantités concernées, comme par exemple le facteur de réflectance bidirectionnelle (FRB) qui en est une approximation et une généralisation. Le FRB est défini comme étant le rapport entre le flux réfléchi rayonnant à partir de la surface et le flux réfléchi rayonnant à partir d'une même surface idéale et diffuse sous des conditions identiques d'illumination et de géométrie (Schaepman-Strub et al., 2006). Une surface idéale (Lambertienne) réfléchit la même quantité de lumière dans toutes les directions du demi-espace. Le FRB est le paramètre optique le plus objectif pour caractériser les propriétés intrinsèques des surfaces car il est en principe indépendant des propriétés du capteur, de l'atmosphère et de l'éclairement (O'Neill et al., 1997). Ce FRB sera la quantité qui nous servira à caractériser la réflectance apparente de surface de nos surfaces imagées aux différentes altitudes, et simulées au sol. Dans les mêmes conditions de prise de mesure angulaire on est dans une approximation de la réflectance et il y a donc un lien direct la réflectance apparente et le FRB tel que défini dans O'Neill et al., 1995.

La plupart des modèles atmosphériques sont basés sur la caractérisation standard des paramètres physiques permettant de standardiser de manière justifiable la variation de certaines caractéristiques physiques, comme la prise en compte de profils standard d'AOD par exemple. L'absorption, la diffusion et l'interaction entre ces deux mêmes processus en fonction de la teneur en gaz et particules et les propriétés intrinsèques de ceux-ci apporteront une perturbation au signal provenant de la cible en

fonction de la longueur d'onde considérée (Vermote et al., 1997). On distinguera d'ailleurs dans les modèles une contribution atmosphérique moléculaire et une contribution atmosphérique particulaire ; chacune étant soumises à des lois de diffusion et absorption distinctes qu'il faudra considérer. On prendra en compte aussi le fait que les propriétés de certains constituants (notamment leur concentrations) auront tendance à varier en forte proportion, constituant à eux seuls les intrants des modèles. L'épaisseur optique des aérosols et, pour certaine longueurs d'ondes, la teneur en vapeur d'eau, sont par exemple deux paramètres très variables qui nécessitent une estimation comme intrant au modèle de transfert radiatif. Néanmoins leur variation relative en fonction de l'altitude, c'est à dire leur profil vertical, est standardisé dans les modèles, ainsi la concentration relative en aérosols de l'atmosphère suit une tendance empirique bien établie dans les modèles atmosphériques (McClatchey et al., 1972).

De nombreuses études ont été effectuées sur les corrections atmosphériques standard. Dans notre cas nous aborderons des situations où l'on est confronté à des atmosphères non habituelles qui voient les variations de certaines paramètres physiques non pris en compte dans les modèles atmosphériques standard. S'il s'agit de paramètres majeurs à la contribution du signal, l'erreur commise en ignorant ces variations peut alors être conséquente. Dans ces situations, il va être important de pouvoir détecter et établir une méthodologie adéquate de reconnaissance et de caractérisation de la variation perturbatrice. En collectant le maximum d'informations disponibles sur cette singularité atmosphérique on parviendra à effectuer la correction atmosphérique adéquate ; ce qui veut dire que la méthodologie pourra varier en fonction de la perturbation étudiée.

L'étude des panaches de fumée dans l'atmosphère est très diversifiée en terme d'étude morphologique des panaches (Islam, 1999), de mesures distinctes et relevés de paramètres atmosphériques in-situ (Shinozuka et al., 2011) de propagation et diffusion particulaire proche de la source émettrice, de modélisation en terme de transfert radiatif pour des feux locaux (Alakian et al., 2007) ou de suivi à long terme de grandes formations atmosphériques (Val Martin et al., 2010). Cependant les études sont peu nombreuses en ce qui concerne l'application de cette information à des images de télédétection pour en extraire des paramètres physiques et quantités biophysiques au sol, elle deviennent pratiquement inexistantes lorsque la paramétrisation de l'atmosphère consiste à intégrer et modéliser dans un modèle atmosphérique la perturbation en terme de variation singulière des paramètres atmosphérique standard.

Le modèle de transfert radiatif utilisé sera le modèle CAM5S qui est une variante du modèle 6S (O'Neill et al., 1997). L'objectif d'une correction atmosphérique est d'obtenir l'expression de la réflectance apparente au sol $R^*(0)$ (une nomenclature qui reflète l'idée que l'illumination est une combinaison de radiation solaire et diffuse : voir O'Neill et al., 1995). Cette obtention va nécessiter l'acquisition à partir d'une certaine altitude z de la luminance apparente $L^*(z)$ d'une cible au sol ; puis un estimât, à partir de la caractérisation de la perturbation atmosphérique apportée sous cette altitude, de la réflectance apparente hémisphérique au sol. Dans le processus de calcul, il faudra entre autre passer par l'utilisation de la réflectance apparente au capteur $R^*(z)$. On définit pour une surface quelconque la réflectance apparente au capteur $R^*(z)$ simplement selon l'équation 1.2.1 suivante (O'Neill et al., 1995; Nicodemus, 1977) :

$$R^*(z) = \frac{\pi L^*(z)}{E_{tot}(z)} \quad (1.2.1)$$

où $E_{tot}(z)$ est l'éclairement incident solaire (direct et diffus) à l'altitude z .

1.2.1. Présence assez fréquente d'atmosphères non-standard

Les modèles atmosphériques sont basés sur une standardisation de leurs paramètres physiques qui figent la variation de certains d'entre eux, comme la concentration en aérosols de l'atmosphère en fonction de l'altitude. Nous avons abordé et défini ceux-ci dans l'introduction.

Les régions continentales de latitudes moyennes sont généralement associées à des charges élevées d'aérosols atmosphériques (Erlick et Frederick, 1998). Les conditions non standard en Amérique du Nord sont retrouvées fréquemment notamment lors de feux de forêts, les événements de pollution, les panaches volcaniques ou parfois des nuages de poussières désertiques. En ce qui concerne les panaches de fumée, ce sont des événements assez fréquents au Canada durant la saison estivale. Ces panaches provenant de feux de forêt venant généralement des régions de l'Ouest canadien et de l'Alaska et même de la Russie car ils peuvent effectuer des distances considérables autour du globe (Damoah et al., 2004). C'est un événement de ce genre que nous avons constaté sur notre zone d'étude située au Québec. L'été 2004 fut l'une des saisons comportant le plus grand nombre d'incendies jamais observés en Amérique du Nord, en raison de la grande persistance d'incendies de forêt dans les forêts boréales de l'Alaska et du Canada résultant d'une période exceptionnellement chaude et sèche (Turquety et al., 2007). Une climatologie des hauteurs des panaches de fumée à proximité de leurs sources au dessus de

l'Amérique du Nord a été récemment compilée par Val Martin et al., 2010. à partir des données du capteur MISR; ces auteurs ont observé une distribution de hauteurs de panache de fumée entre quelques centaines de mètres et 5 km sur l'ensemble de l'Amérique du Nord.

Par la connaissance des intrants physiques standard à paramétrer dans un modèle de transfert radiatif on peut arriver à une correction atmosphérique correcte ; mais une perturbation inhabituelle est à résoudre différemment et le cas échéant, la singularité atmosphérique est à modéliser si cela est le cas.

1.2.2. Le problème des atmosphères non standard

Nous aborderons ici une introduction aux conditions des paramètres physiques (des aérosols) non-standard dans un modèle de transfert radiatif. La problématique initiale a été soulevée par les objectifs fixés dans la continuité du travail de Martin Bergeron (2005). Le but étant de généraliser le bilan d'erreur d'un modèle atmosphérique à un maximum de cibles au sol afin de valider celle-ci par une méthode de régression multi-altitude. Cependant les données obtenues, afin de mener à bien cet objectif, ont nécessité un traitement en aval afin de parvenir à modéliser correctement un panache de fumée non paramétré avec le modèle original de transfert radiatif implémenté dans CAM5S. Cela va nous amener à effectuer un protocole de traçabilité des panaches de fumée. En effet, l'utilisation de données hyperspectrales avec un modèle atmosphérique aux intrants standard reste une méthode souple et nous allons nous efforcer de conserver cette souplesse afin de garder une méthodologie qui ne soit pas contraignante. Lorsqu'une perturbation atmosphérique importante est présente sur une image, la question de la sélection d'un protocole à adopter pour essayer de modéliser au mieux celle-ci se pose.

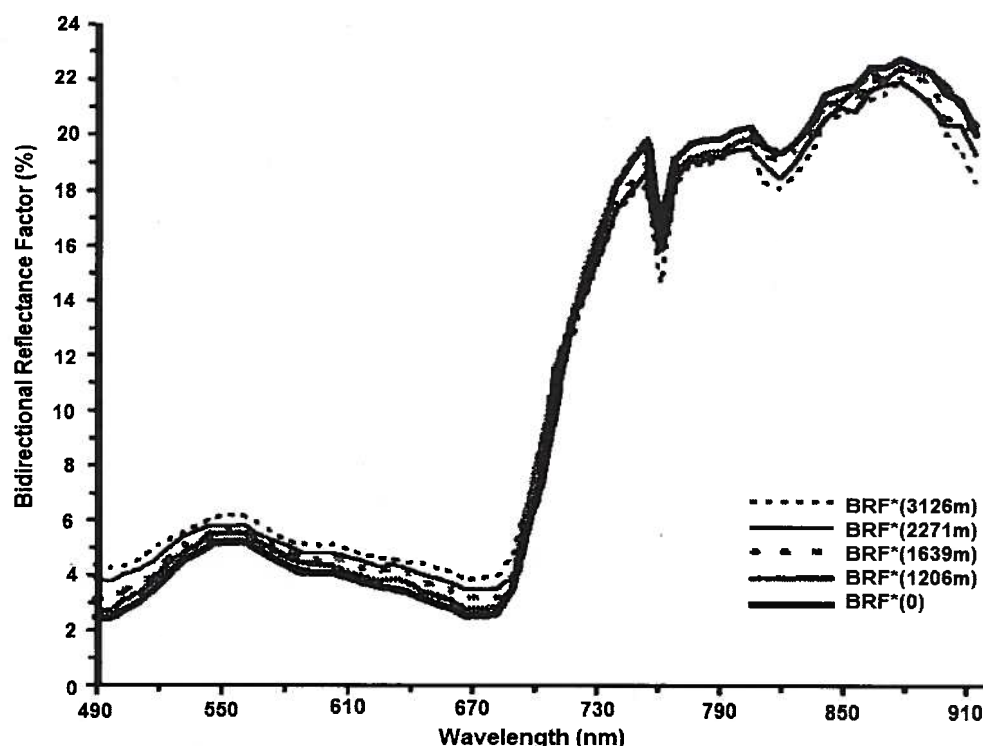


Figure 1.1 - FRB multi-altitude acquises au dessus d'une végétation dense sombre (épinette noire) lors de la campagne de terrain BOREAS 1994 (d'après Zagolski et al. 1999).

Avec le modèle CAM5S standard on va montrer ci-dessous que les résultats sont peu cohérents avec nos données, d'où l'importance de modéliser cette atmosphère non standard. La figure 1.1 démontre la variation en altitude des spectres de $R^*(z)$ pour des mesures aéroportées acquises pendant l'expérience BOREAS en 1994 (Zagolski et al., 1999). Cette variation en altitude a été utilisée par ces auteurs dans une régression multi-altitude pour sortir (entre autre) un estimât de $R^*(0)$; (le symbole $R^*(0)_{\text{validation}}$ sera utilisé pour cette quantité importante). O'Neill et al. (1997) a utilisé cette même technique pour sortir un estimât de $R^*(0)_{\text{validation}}$ afin de valider la qualité de leur corrections atmosphériques. On a utilisé une méthode semblable pour le cas de Saint-Jean-sur-Richelieu, mais on note que la forte variation de notre atmosphère entre les différents vols a nécessité une approche modifiée afin de sortir $R^*(0)_{\text{validation}}$ (voir aussi la discussion sur la figure 1.2 pour plus de détails).

L'estimation de $R^*(0)_{\text{validation}}$ va permettre de construire l'erreur $dR^*(0)$ d'un modèle donné de manière très simplement énoncé dans la formulation 1.2.2 suivante. Il faudra juste s'assurer que le résultat du modèle à estimer est censé exprimer la même quantité physique que $R^*(0)_{\text{validation}}$ à savoir la réflectance apparente au sol mais au travers de son propre processus de correction dont nous voulons estimer le biais. On conseille alors de se reporter à la figure 2.1 et son explication qui commente aussi cette estimation.

$$dR^*(0) = R^*(0)_{\text{modèle étudié}} - R^*(0)_{\text{validation}} \quad (1.2.2)$$

L'originalité de l'étude présente réside dans le fait que de multiples trajets de la même zone pris à des altitudes différentes vont servir à étudier de manière suffisamment précise le comportement de l'atmosphère et cela aussi bien dans des conditions atmosphériques standards telles que décrite selon Elterman, 1970 ; que perturbées par un événement turbide occasionnel comme un panache de fumée qui constituera un événement qui se superposera en terme de profil atypique de quantité physique aux conditions standard paramétrables par un modèle atmosphérique. Pouvoir caractériser au mieux les perturbations atmosphériques et les comparer à des conditions standard permet à terme de modéliser convenablement la situation optique particulière d'une zone d'étude. On obtiendra ainsi un bon estimât de la réflectance apparente au sol ($R^*(0)$) qui servira de base pour la validation des résultats d'une correction atmosphérique. Cela représentera aussi un premier effort dans la modélisation de situations atmosphériques particulières en présence de panache de fumée.

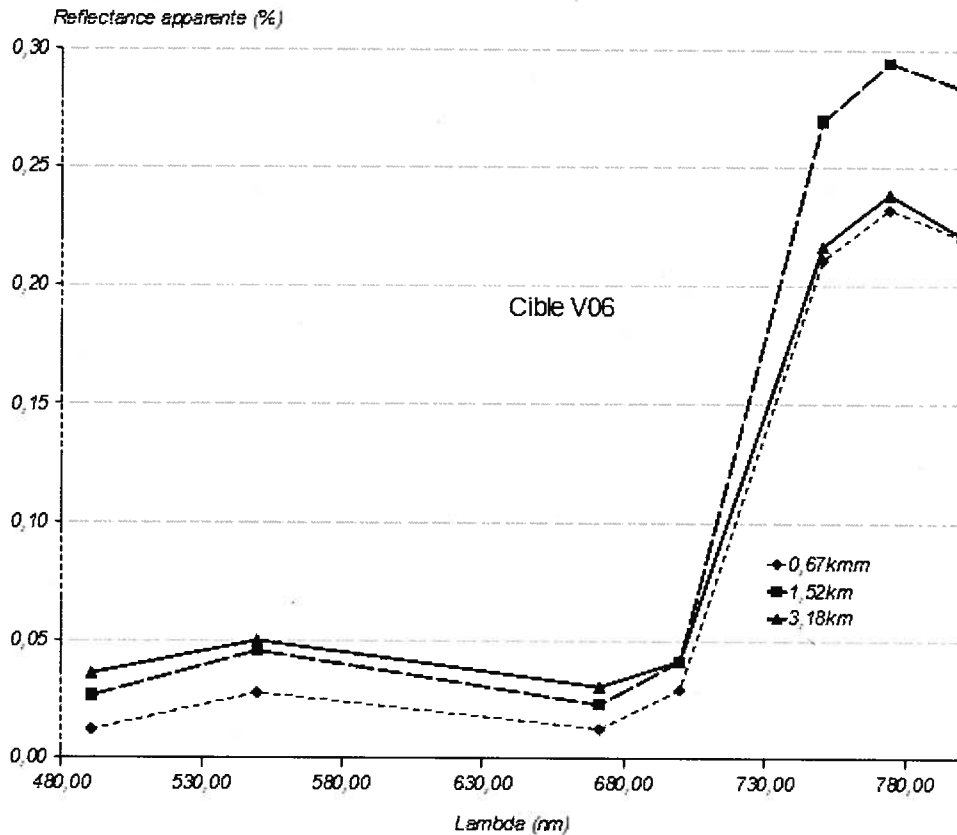


Figure 1.2 - Luminances apparentes extraites des images CASI pour une cible végétale à comparer avec Zagolski, 1999. En dehors de l'échantillonnage différent (7 bandes CASI) l'évolution des réflectances apparentes aux altitudes pour une cible de même type (couvert végétal) n'est pas similaire à celles montrées dans la figure 1.1 pour les trois dernières bandes CASI

La figure 1.2 illustre la variation des réflectances apparentes pour une des cibles de notre site d'étude. La variation non attendue par rapport à la figure 1.1 (spécifiquement dans le PIR pour ce cas particulier) et pour des autres cibles est au moins en partie due au fait que notre atmosphère était beaucoup plus variable que celle présente dans l'étude de Zagolski et al. (1999) et O'Neill et al. (1997).

1.2.3. Protocole de traitement dans le cas d'atmosphères non-standard

Nous abordons deux parties dans ce travail à savoir la recherche des valeurs de $R^*(0)$ afin de valider les corrections atmosphériques et la correction atmosphérique standard et non standard dans le but de faire des comparaisons avec le $R^*(0)$ issu du premier processus.

Le point commun entre ces deux processus liés est la connaissance du transfert radiatif dans une atmosphère non standard perturbée par un panache de fumée avec une modélisation de celui-ci et l'ajustement des luminances à partir du transfert radiatif appliqué aux épaisseurs optiques non-standard c'est à dire lorsque l'on considère une "colonne" de distribution de l'épaisseur optique non habituelle. Pour une distribution uniforme du rayonnement incident (c.-à.-d. le rayonnement solaire) et une atmosphère qui est horizontalement homogène, le transfert radiatif est unidimensionnel et le rayonnement rétrodiffusé peut être exprimé en termes simples, mais pour le cas de variations spatiales des propriétés de l'atmosphère, le problème est plus compliqué et le transfert radiatif devient multidimensionnel (Mueller et Crosbie, 2002). La complexité de la situation est relativement forte car, avec un panache qui n'est jamais horizontalement homogène on doit strictement trouver une solution 3D de transfert radiatif. On ne peut pas traiter les colonnes de l'atmosphère de façon indépendante mais dans l'intérêt de trouver une solution pratique et la plus simple possible on présume qu'une approche non-homogène selon la direction verticale (une colonne) sera suffisamment précise pour nos besoins de corrections atmosphériques (en tenant compte des variations horizontales à partir des estimations de la variation horizontale de l'épaisseur optique). Une vraie solution tridimensionnelle tiendrait compte de toute l'allure 3D du panache dans une seule solution de l'équation du transfert radiatif mais notre modèle de corrections atmosphériques (comme presque tous les modèles de corrections atmosphériques) est uni-dimensionnel, et concernera la caractérisation verticale de nos perturbations atmosphériques. Par conséquent nous avons recours à une solution qui sera quasi 3D, traitée colonne par colonne (i.e. on traite les colonnes verticales d'atmosphère de façon indépendante comme s'il n'y avait pas de photons qui traversaient les frontières entre les colonnes). Nos points de mesures ne permettaient pas de toute manière un contrôle tridimensionnel, c'est une modélisation très partielle d'un phénomène 3D avec une modélisation verticale du panache car on ne peut pas prendre en compte une modélisation en x et y du panache). En ajoutant alors une spatialisation limitée de notre problème en fonction des paramètres disponibles (explicitement dans la direction verticale et colonne par colonne dans la direction horizontale) on sera en mesure de caractériser la situation atmosphérique sur notre zone d'étude qui est aussi caractérisé par une variation temporelle des paramètres physiques de l'atmosphère.

1.2.3.1 Processus d'extraction de $R^*(0)$ par la modélisation du transfert radiatif non standard:

En se basant sur une modélisation simple et en fonction des données disponibles nous allons établir un processus itératif afin de tenir compte de l'hétérogénéité verticale de l'atmosphère à Saint-Jean-sur-Richelieu. Elle sera suivie d'une normalisation pour tenir compte de la variation temporelle de l'AOD pour chaque image ainsi que chaque site incluant les variations horizontales de l'atmosphère. Ce processus permet de déterminer $R^*(0)$ et cette valeur peut être comparée à une valeur de $R^*(0)$ provenant d'une correction atmosphérique de CAM5S (avec et sans l'incorporation des effets perturbants). L'avantage de cette méthode consiste à employer les intrant classique des modèles atmosphériques et de simplement modifier la variation en altitude de ces paramètres dans le code du transfert radiatif. Puisque le vol le plus bas est proche de la surface, la valeur de $R^*(0)$ n'est pas très sensible aux pistes assez compliquées que l'on a prises pour trouver cette valeur. Ce processus rudimentaire permet néanmoins de comprendre le transfert radiatif non-homogène à St-Jean-sur-Richelieu.

1.2.3.2 Correction atmosphérique standard et non standard:

En reprenant l'étude au niveau du survol à la plus haute altitude (et de son AOD correspondant) on prendra en compte la contribution la plus importante de l'atmosphère. Par conséquent le jeu de données correspondant comportera le plus de perturbations liée à la singularité atmosphérique et pourra être alors comparé aux mesures prises par satellites. En fonction de ce jeu de données on réalisera une correction atmosphérique standard (CAM5S normal) et non standard (CAM5S avec la modélisation du panache) ce qui permettra de comparer les résultats obtenus et donc de critiquer l'apport de notre modélisation non-homogène au modèle de correction atmosphérique.

1.3. Hypothèse de recherche

Notre hypothèse de recherche constitue à apporter une réponse concernant la paramétrisation d'une atmosphère non prise en compte par les modèles standard, et ainsi de pouvoir estimer les paramètres de surface dans une situation atmosphérique non-standard. L'objectif de cette recherche est la contribution que pourrait apporter une modélisation correcte de l'effet atmosphérique dans le cas non-standard, le

seul moyen de valider cette hypothèse serait donc d'obtenir un paramètre de surface, avec cette modélisation, identique à celui d'un cas standard puisque les paramètres de surfaces sont censés être indépendant des conditions atmosphériques. Il est cependant assez difficile de pouvoir paramétrer et quantifier une telle perturbation d'un point de vue technique et pratique. Notre hypothèse de recherche focalise alors spécifiquement sur une modélisation simple de l'atmosphère en fonction des paramètres quantifiables de cette atmosphère non-standard ; c'est à dire que nous supposons qu'une estimation et une paramétrisation très simple d'une perturbation non-standard permettra d'apporter une correction acceptable d'un effet atmosphérique à la réalité beaucoup plus complexe et non paramétrable avec les outils et capteurs disponibles. En d'autres termes, on cherche à valider la modélisation d'une atmosphère non standard et plus spécifiquement une atmosphère contenant un panache de fumée par la modélisation d'une singularité atmosphérique à implémenter dans les modèles standard ce qui permettrait d'améliorer une correction atmosphérique réalisée à partir d'un modèle uni-dimensionnel de transfert radiatif. Ce raisonnement nous permettra aussi d'arriver aussi à la comparaison entre correction atmosphériques standard et non-standard.

1.4. Objectifs de la recherche

1.4.1. Objectifs généraux

On doit arriver à établir une chaîne de correction des données de télédétection avec les intrants standard d'un modèle afin d'arriver à une vérité terrain et pouvoir répondre à la problématique de la généralisation des corrections atmosphériques dans des conditions standard et non-standard, on doit pour cela être capable de modéliser au mieux les perturbations occasionnelles présentes dans l'atmosphère. On vise à démontrer que la correction atmosphérique en soit sera meilleure si on modélise correctement la non-homogénéité de l'atmosphère. Il faudra donc arriver à établir une chaîne de correction avec les intrants standard d'un modèle afin de parvenir à l'obtention de $R^*(0)$ et donc répondre à la problématique du bilan d'erreur. C'est à dire améliorer la connaissance et la modélisation de l'atmosphère en général et permettre aussi d'améliorer le bilan d'erreur de modèles atmosphériques.

1.4.2. Objectifs spécifiques

On doit parvenir à modéliser particulièrement des données non standard à l'aide de ce cas unique de panache de fumée et spécifiquement notre protocole de correction complet aussi bien d'un point de vue morphologique que d'un point de vue radiatif. Un objectif spécifique qui apparaît aussi évident est celui d'apporter une capacité de modélisation de perturbation atmosphérique non-homogène sans avoir fait de mesures spécifiques sur place concernant la modélisation de cette perturbation, ce qui est aussi une approche de la modélisation *a posteriori*. Cette modélisation est une approche intéressante du fait que de nombreuses perturbations sont seulement détectées à l'analyse des données recueillies pendant une campagne de terrain. Ainsi cela permettrait dans un deuxième temps d'appliquer cette modélisation à un modèle de transfert radiatif afin de valider et améliorer l'obtention des paramètres propres aux surfaces imagées (la réflectance apparente de surface) ou du moins d'améliorer considérablement les corrections atmosphériques standard.

2. Méthodologie

Dans cette partie nous présentons notre méthodologie et la démarche pour établir le protocole de modélisation du panache. On doit justifier aussi notre choix d'une méthode qui maintienne le même modèle de transfert radiatif uni-dimensionnel accompagné des relativement simples modifications du profil vertical des aérosols. Cette démarche est aussi limitée par la capacité à caractériser correctement la situation atmosphérique en fonction des données disponibles. En effet peu de mesures réelles seront disponibles et acquises pour retracer le panache de fumée depuis sa source d'émission et nous aurons donc majoritairement recours à des modélisations de son parcours (backtrajectories) qui sont des sources importantes d'approximations.

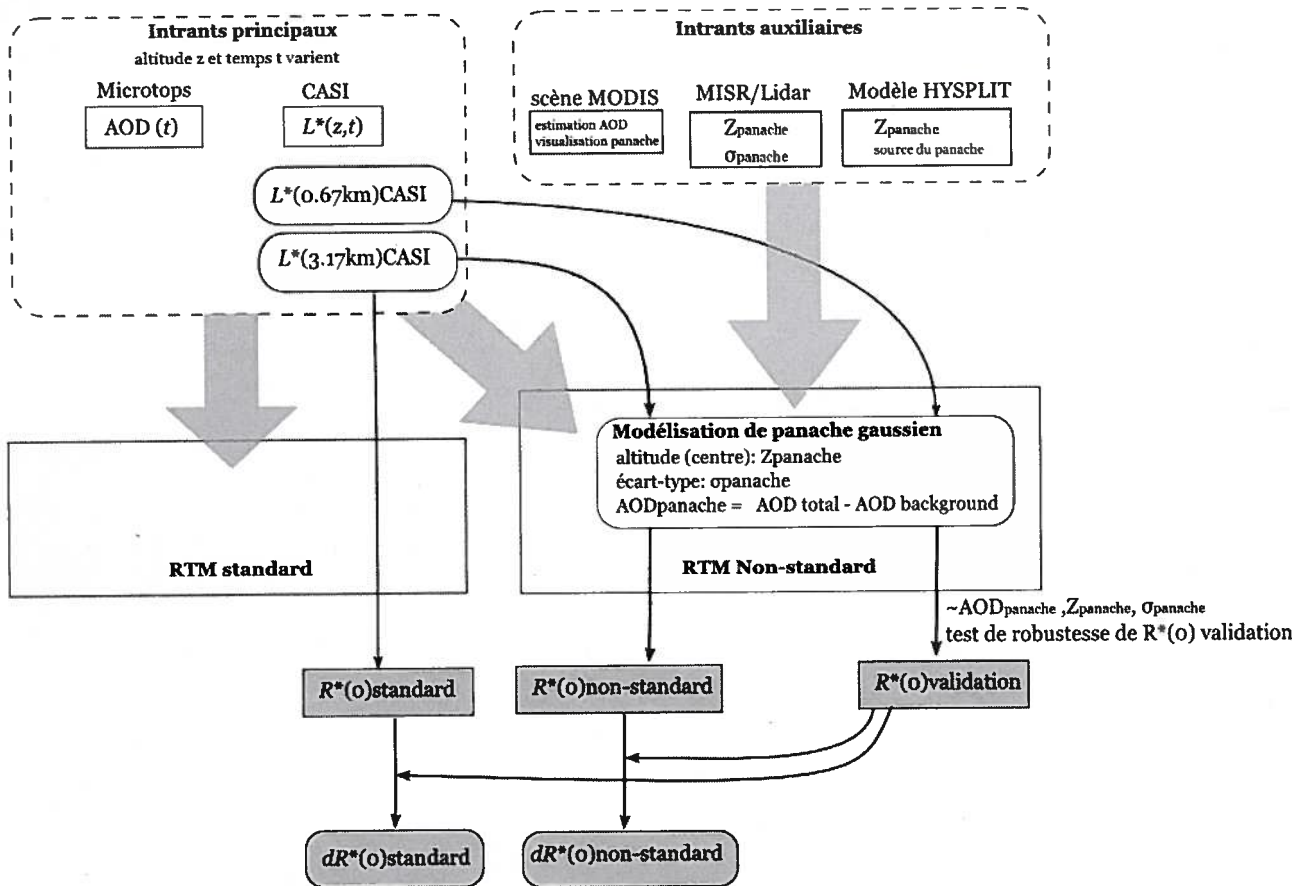


Figure 2.1 - Organigramme méthodologique général

2.1. Méthodologie générale

La figure 2.1 illustre la méthodologie que nous allons utiliser afin d'arriver à notre caractérisation générale:

En haut de l'organigramme sont disposé nos données, d'une part les intrants principaux à savoir les luminances apparentes CASI et les AODs et d'autre part les intrants auxiliaires qui vont nous servir à modéliser le panache de fumée.

Une fois la modélisation du panache implémentée dans le modèle de transfert radiatif (RTM) c'est à dire en terme d'épaisseur optique du panache ($AOD_{panache}$), de distribution définie par un centre de distribution gaussienne ($Z_{panache}$) et d'écart-type ($\sigma_{panache}$), on pourra alors estimer $R^*(0)_{validation}$ en utilisant la valeur de réflectance apparente à la plus basse altitude. Cette réflectance sera moins affectée par les conditions atmosphériques sus-jacentes ; une vérification de cette robustesse sera effectué en faisant

varier les paramètres de la modélisation pour prouver cette stabilité de la réflectance apparente au sol résultante. Cette réflectance apparente au sol de validation servira alors de base pour valider les corrections atmosphériques apportée sur les réflectances aux autres altitudes (et notamment la plus haute) afin de contrôler la modélisation de notre panache dans le modèle non-standard. Par la suite il sera possible d'effectuer une comparaison entre les $R^*(0)$ obtenus avec cette même altitude lorsque l'on utilise le modèle standard et non standard. Cette comparaison sera réalisée en estimant l'erreur respective en réflectance apparente $dR^*(0)$ pour les deux modes du RTM, à savoir $dR^*(0)_{\text{standard}}$ et $dR^*(0)_{\text{non-standard}}$. On remarquera aussi que la modélisation du panache dans le RTM fait intervenir une épaisseur optique spécifique qui sera extraite de l'AOD totale mesurée moins une AOD de background qui sera à déterminer en fonction des données auxiliaires disponibles qui vont nous permettre de déterminer cette valeur (extraction des AOD MODIS et mesures de photomètres solaires).

2.2. Caractérisation du panache

On initie notre démarche dans le cadre d'un panache de feu de forêt dont le profil vertical de la concentration des particules de fumée sera approximée selon un modèle gaussien avec un centre de distribution: z_{panache} et un écart-type: σ_{panache} . En effet les panaches gaussiens sont des modèles simples fréquemment utilisés dans les modélisations atmosphériques (Lushi et Stockie, 2010). Il se trouve que cette simplicité de leur représentation ne nécessite que deux paramètres : ce niveau de simplicité de représentation est vraisemblablement suffisant pour nos besoins étant donné la difficulté de retracer et modéliser cette perturbation et étant donné les exigences de transfert radiatif que l'on s'impose (la validation de notre hypothèse).

Le but de la première étape est de vérifier si nous ne sommes pas dans le cadre d'un fonctionnement du modèle de transfert radiatif standard et dans le cas contraire il faudra retracer la perturbation afin de la modéliser. Il faudra dans un premier temps obtenir une vue géographique à grande échelle, à partir d'une image MODIS par exemple qui va placer dans un contexte global l'évolution du panache durant son advection vers la zone d'étude. On peut facilement détecter des panaches de fumée sur une scène MODIS mais cette couche d'information ne validera que la présence du panache et non sa morphologie. Seules des données LIDAR ou MISR vont pouvoir permettre de tracer un profil de cette perturbation. L'aspect ponctuel en temps et espace de ces capteurs (on ne peut qu'obtenir des "instantanés" du panache à certains points et certains temps) va nous obliger à faire intervenir des modèles de

propagation de parcelle d'air dans l'atmosphère de manière tridimensionnelle et ce de manière rétroactive ou prospective comme le fait le modèle HYSPLIT (voir la section sur les données complémentaires).

Les intrants principaux sont l'AOD mesuré au sol durant les survols CASI et les luminances apparentes CASI ; les intrants auxiliaires sont les centres et écart-types des distributions de l'AOD du panache. On aura eu aussi à estimer une séparation de l'AOD total en une somme d'AOD de background et d'AOD correspondant seulement au panache. Une fois ces quatre paramètres définis correctement, c'est à dire une fois le panache correctement défini temporellement et physiquement on peut alors passer à une modélisation dans le modèle de transfert radiatif de notre choix et suivre la méthodologie que nous nous sommes fixé.

3. Description du site d'étude et des données

Dans cette section nous décrirons le site d'étude, la technologie et les capteurs utilisés, les sensibilités et les domaines spectraux utilisés ainsi que la qualité des données et leurs couvertures spectrales et spatiales afin de déterminer et caractériser au mieux le jeu de données disponibles qui nous servira pour mener à bien nos objectifs de recherche.

3.1. Description du site d'étude

La campagne de terrain a été effectuée le 20 juillet 2004 dans une zone située au Sud-est de Montréal à proximité de la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu, Montérégie, Québec, CANADA. La région d'étude présente une bonne diversité de surfaces naturelles. Ainsi, bien que principalement dominée par du parcellaire agricole et des régions boisées, le secteur présente aussi un tissu urbain relativement dense avec la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu, des zones minières et bitumeuses (carrière et aéroport) et des surfaces assez conséquentes d'eau avec notamment la rivière Richelieu. Les trois survols de la même zone (667 mètres, 1,59 km et 3,17 km) permettent de caractériser les mêmes surfaces avec des contributions atmosphériques évoluant en fonction de l'altitude et du temps. Le protocole de mesure basé sur trois altitudes se fonde sur les recommandations exposées par (O'Neill et al., 1997), la plus basse altitude apportant les valeurs de réflectance apparente relativement proche de quelques pour-cent de celle pouvant être mesurée au sol, $R^*(0)$ (Moran et al., 1992). On utilisera ce terme de réflectance apparente qui reste différente de la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (BRDF) car tenant compte des contributions distinctes de l'éclairement solaire et diffus tel que décrit dans O'Neill et al., 1995. On notera aussi que les acquisitions n'ont débuté qu'à partir de 16h00 heure locale

du fait des mauvaises conditions atmosphériques antérieures. L'heure d'acquisition des trois survols CASI relativement tardive ne sera pas sans influence sur la radiométrie des données (à cause des relativement grands angles zénithaux du soleil) et devra être prise en considération pour les traitements et conclusions ultérieurs. La diversité des surfaces ainsi imagées va permettre de réaliser une étude sur un ensemble de cibles au sol avec une dynamique spectrale plus conséquente, comme conseillé par les travaux de Bergeron en 2005.

La figure 3.1 montre la zone d'étude imagée par les trois survols CASI. Sur cette composition fausse couleur Landsat du 26 juillet 2004 à 15:21 UT (R=7 V=4 B=2) on a superposé les traces des trois trajets CASI (les images seront détaillées par la suite à la figure 3.3). Le satellite Landsat fait partie d'un programme de la NASA mis en place depuis le début des années 1970 (Lauer et al., 1997). Il a constamment et systématiquement archivé des images de la Terre ce qui a permis entre autre de donner la capacité scientifique pour évaluer les détections de changements dans les paysages de la terre et de permettre une cartographie relativement à jour des surfaces terrestres. Ainsi le capteur Landsat a une résolution spatiale dite modérée, ne permettant pas la distinction détaillée des objets urbains mais permettant l'identification des grandes structures tels que les autoroutes, champs, bois, etc. Cette résolution spatiale sera idéale dans notre cas pour caractériser la couverture globale de notre zone d'étude et faire ressortir les structures urbaines. On peut aussi remarquer que la scène Landsat du 26 juillet présente de nombreuses variations, apparemment atmosphériques (direction sud-ouest / nord-est) qui sont soit des nuages minces soit des panaches de fumée qui ressortent avec une coloration plus bleutée. Cependant comme l'image est prise une semaine après la campagne de terrain, nous ne nous attarderons pas sur ces considérations et garderons l'approche et l'apport uniquement cartographique de cette image en terme de géolocalisation.

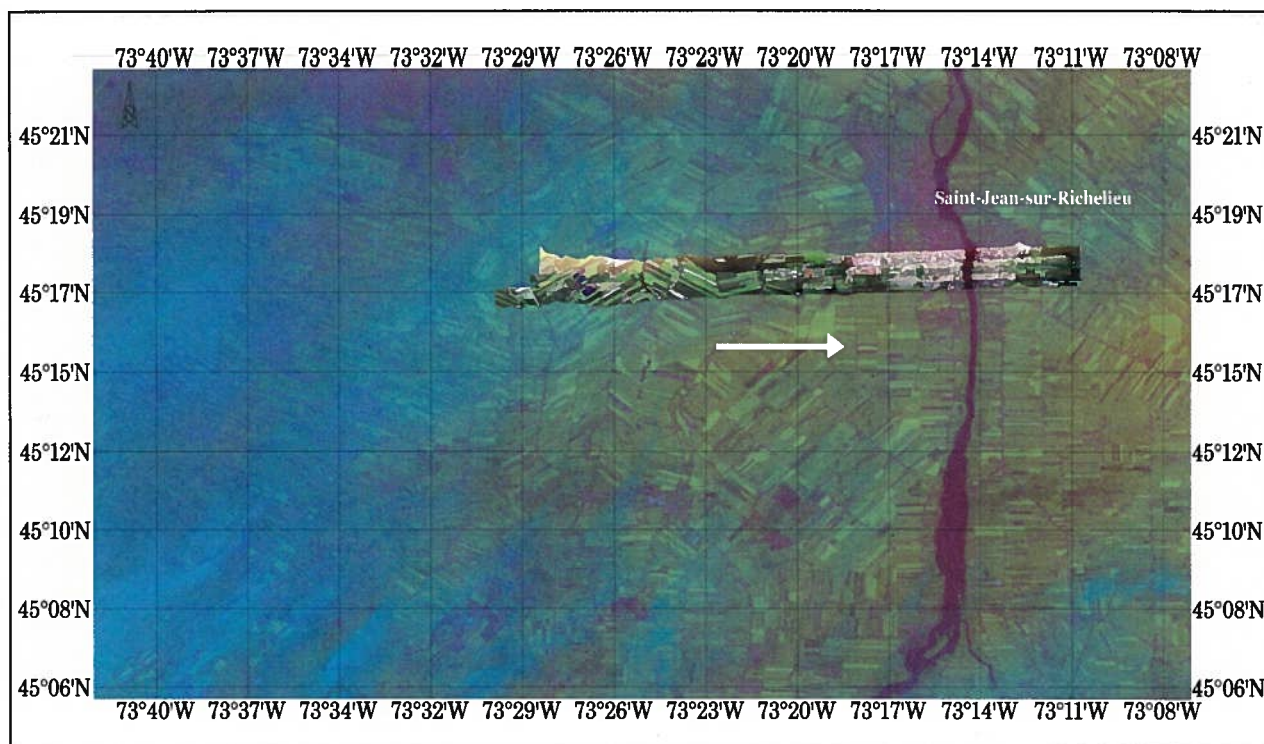


Figure 3.1 - Zone d'étude de Saint-Jean-sur Richelieu. Composition colorée Landsat du 26/07/04 à 15:21 UT [R=bande7 (2090-2350nm) V=bande4 (750-900nm) B=bande2 (525-605nm)] et superposition des 3 trajets CASI. La flèche en blanc indique la direction de vol de l'avion durant l'acquisition pour les trois altitudes

3.2. Données principales

3.2.1. Images hyperspectrales aéroportées CASI:

Le capteur hyperspectral a été paramétré pour acquérir selon 7 bandes réparties sur le spectre du VIS et PIR. Les caractéristiques des bandes de nos images CASI sont montrées au tableau 3.1 (FWHM correspond à « Full Width at Half Maximum » soit la largeur à mi-hauteur).

Tableau 3.1 - bandes spectrales des images CASI

bande	Lambda (nm)	FWMH (nm)
1	490,74	6,17
2	549,68	5,25
3	671,3	4,34
4	699,76	4,35

5	750,19	3,41
6	774,05	4,37
7	799,86	5,33

Le CASI a subi une calibration radiométrique similaire à celle effectuée pour la campagne BOREAS comme décrit dans Miller et al., 1995. Cette étape essentielle permet la stabilité temporelle et comporte des étapes d'inter-comparaisons afin de calibrer au mieux la matrice du capteur. Les analyses successives permettent de montrer que le CASI pour la campagne BOREAS respectait des valeurs de calibration avec une précision de 2% par rapport aux méthodes standard de calibration. Finalement les images sont converties en luminances apparentes.

Les données acquises le 20 juillet 2004 sont en luminance apparente $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{Sr}^{-1} \times 100$; voici les caractéristiques principales de chaque image:

Tableau 3.2 - Caractéristiques des images CASI

	Image 1	Image 2	Image 3
Heure d'acquisition	21h09 UT	20h11 UT	20h47 UT
Taille du pixel (m. x m.)	0,81 x 0,98	1,93 x 0,94	3,864x 1,00
Altitude moyenne (m.)	667	1586	3167
Angle zénithal solaire (°)	56,2	46,1	52,3

On peut remarquer que comme pour beaucoup de capteurs à mode d'acquisition de ratissage, le pixel a relativement la même dimension dans le sens d'acquisition des images car sa résolution dépend de la vitesse de la plateforme d'acquisition ; ce qui donne un pixel longitudinal assez constant pour les trois altitudes (de 1,00 à 0,94 mètres). Par contre, la résolution perpendiculaire des images est directement liée à l'altitude du capteur et la dimension équivalente au sol du pixel de manière transversale est donc pratiquement doublée pour chaque altitude supérieure comme représenté à la figure 3.2. Cette déformation du pixel sera à prendre en compte pour les corrections géométriques des images. Les altitudes représentées dans le tableau sont les altitudes moyennes, la figure C de l'Annexe 3 page 92 montre cependant qu'elles ont été relativement constantes sur toute la zone d'étude pour les trois images. On peut aussi relever que l'angle d'acquisition a été le même concernant le capteur comme illustré à la figure 3.2

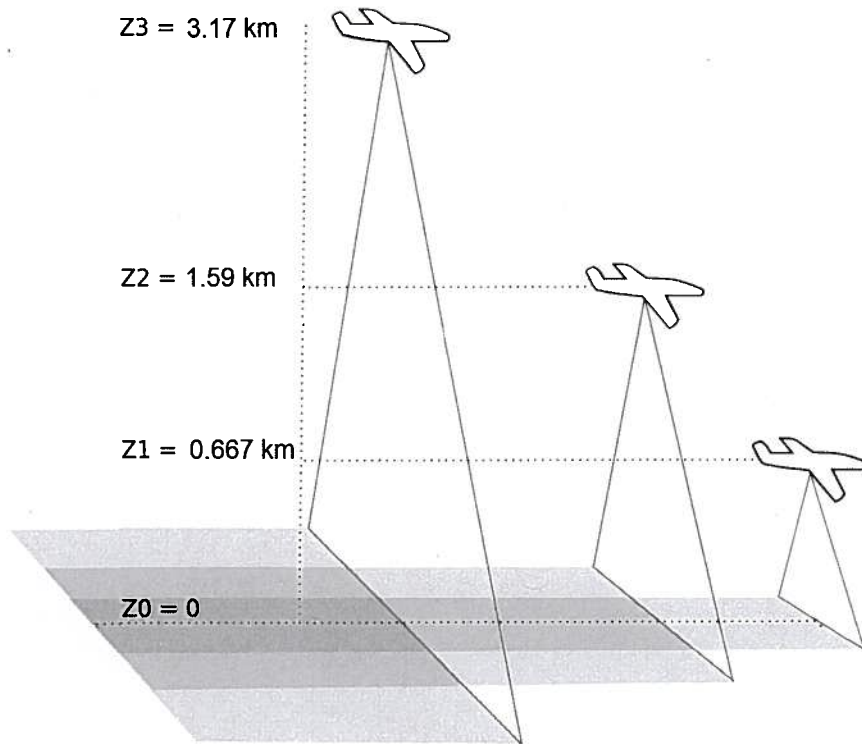


Figure 3.2 - Schématisation des trois survols CASI

On peut faire le premier constat que les zones couvertes par les trois images ne sont pas les mêmes, cela est plus visible sur la figure 3.3 et que nous allons aussi être limité par la couverture de l'image correspondant à l'altitude la plus basse, soit 0,67km. Donc en terme de couverture spatiale d'une même cible avec les trois altitudes on va devoir travailler avec une partie seulement de la zone imagée par la plus basse altitude.

De plus la présence importante de roulis durant l'acquisition amène des déformations importantes qui nécessitent une co-registation assez précise entre les cibles analysées sur les 3 images. Toutes ces considérations ont pu être établies à posteriori, ce qui n'a pas permis de faire coïncider la mesure Microtops avec une cible choisie d'avance sur le terrain, puisque les cibles ont pu être déterminée qu'une fois les images traitées. C'est pourquoi il n'y a pas de correspondance exacte entre la mesure Microtops et une cible puisque le point de mesure géographique du Microtops n'est pas présent sur les images.

Sur la figure 3.3 on montre les images corrigées géométriquement et la localisation de nos 18 cibles tests. On se rend compte que le premier tiers de la zone d'étude a peu de pixel communs aux trois altitudes; de plus les cibles au sol vont être généralement végétales mais nous aurons aussi quelques

cibles de dimension relativement réduites (par rapport aux cibles végétales) d'un type différent (sols nus, eaux, toitures). Chacune de ces 18 cibles est représentée à la figure 3.3, leur numéro est choisi en fonction de leur position dans l'image (à l'exception de la cible 18 qui est centrale et qui a été jointe ultérieurement à cette étude) et commence par une lettre qui caractérise le type de cible. Ainsi les cibles commenceront par « V » pour des surfaces végétales, « C » pour caractériser des cibles « claires », « E » pour les surfaces d'eau et « S » pour des surfaces relativement sombres dans le visible. Chaque cibles est aussi associée à une cible qui correspond à son environnement et qui correspond à une mesure moyennée géographiquement beaucoup plus large que nos cibles moyennes (une moyenne de 400 par 400 pixels environ).

L'environnement n'est pas toujours le même pour chaque cible et constituera aussi un paramètre pour les calculs futurs. En effet deux cibles végétales dans un contexte végétal ou urbain verront leur FRB évoluer différemment en fonction de l'altitude, de la taille de la cible considérée et des conditions atmosphériques puisque l'effet de l'environnement est un paramètre influant sur la réflectance perçue au capteur. Pour ces raisons chaque cible relevée sera associée à une autre cible équivalente correspondant à son environnement proche (cf : Annexe 7). En fonction de ces différents éléments nous avons fait le choix de travailler avec des cibles sélectionnées contextuellement sur les images brutes et non corrigées géométriquement afin d'introduire le moins d'erreur possible. Les corrections géométriques ne vont nous servir que pour faciliter la visualisation des images. L'illustration D de l'annexe 3 montre les différences géométriques entre données corrigées et non corrigées.

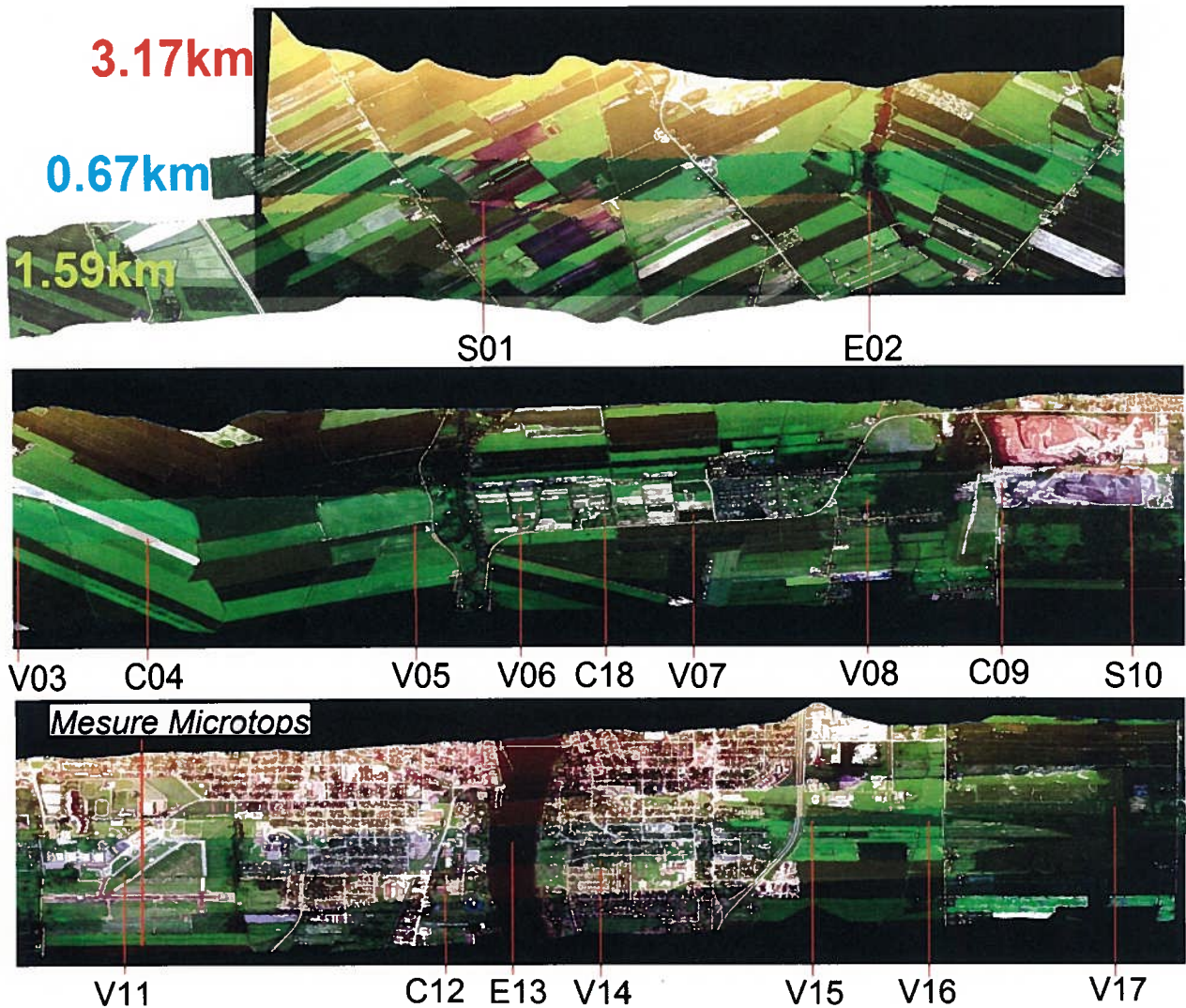


Figure 3.3 - superposition des 3 altitudes CASI (3,17 1,59 et 0,67km) et sélection des cibles au sol représentant les trois survols découpé en 3 sections de l'ouest à l'est pour des commodités d'affichage; (Composition colorée: R:bande 3, V:bande 2, B:bande 1). Le code couleur pour le tracé des spectres correspondant aux altitudes sera respectivement: bleu, vert et rouge pour les altitudes de 0,67, 1,52 et 3,17km.

S'il est question de savoir si le choix des bandes est judicieux pour notre étude, la réponse est affirmative. Originellement choisies pour étudier des cibles végétales pour une thématique d'Agriculture Canada, il se trouve que l'étude de cibles végétales nous permet de visualiser assez bien

les effets atmosphériques sur l'ensemble du spectre VIS-PIR. L'étendue à des cibles de dynamique spectrale différente présentes aussi sur la zone va nous permettre de faire une étude du comportement atmosphérique sur une dynamique assez étendue de réflectances apparentes au capteur.

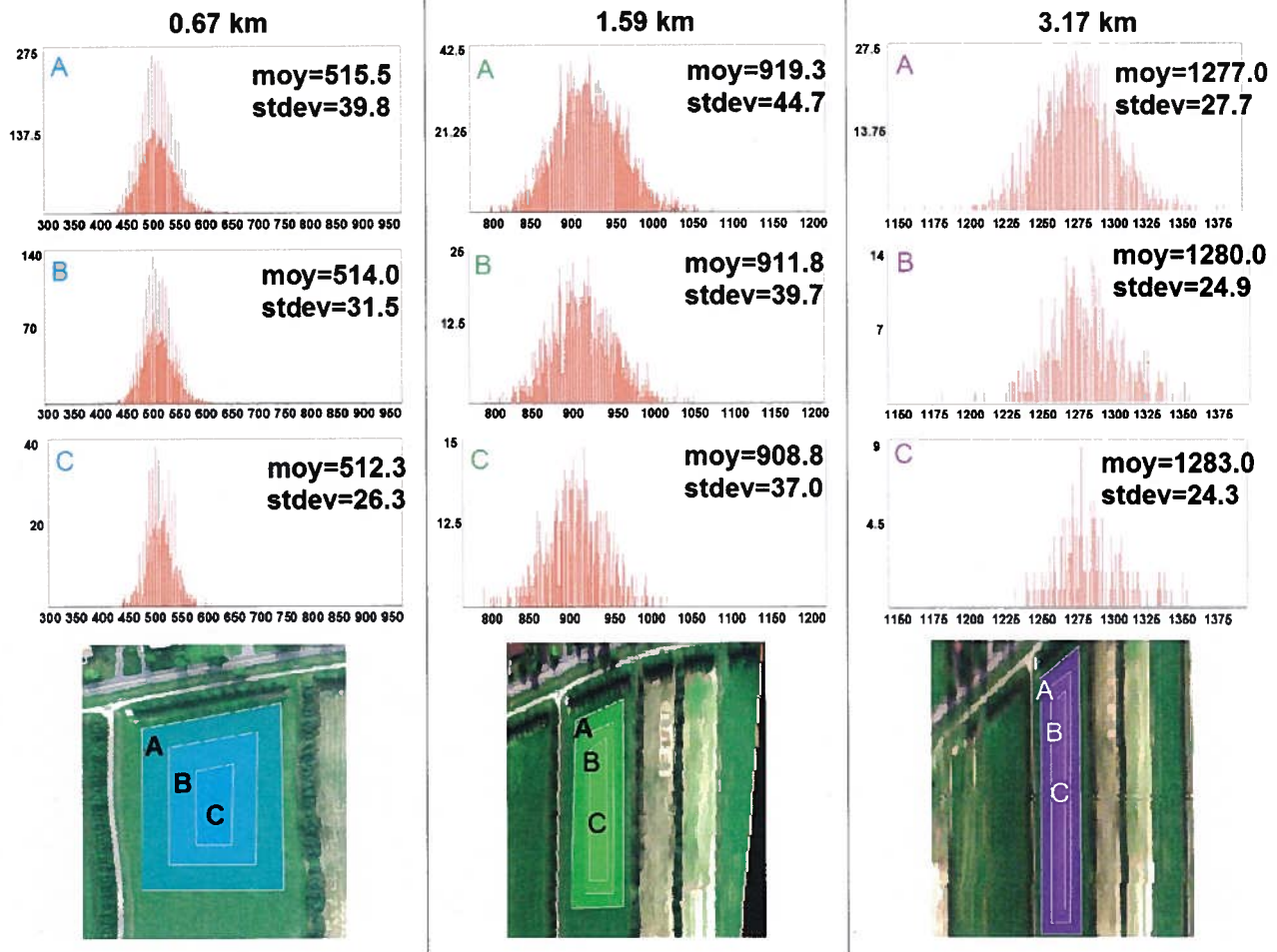


Figure 3.4 - Test d'homogénéité des cibles (dispersion des valeurs et écarts-types), Histogramme de la bande CASI à 671 nm (bande 3) pour les 3 aires (A,B,C) représentées et les 3 altitudes. Les valeurs en abscisse sont en luminance * 100 ($W.m^{-2}.Sr^{-1}.\mu m^{-1} * 100$). Les nombres de pixels correspondant aux différentes aires sont les suivants: $A_{3,17km} = 1513$, $B_{3,17km} = 560$, $C_{3,17km} = 212$; $A_{1,59km} = 3452$, $B_{1,59km} = 1673$, $C_{1,59km} = 847$; $A_{0,67km} = 10494$, $B_{0,67km} = 4673$, $C_{0,67km} = 1204$.

Pour commencer notre étude multi-altitude en s'assurant d'une fiabilité des données, nous avons choisi trois cibles végétales homogènes communes aux trois altitudes. Le choix spectral de ces cibles est pertinent car elles sont non monotones sur le spectre du VIS/PIR, et permet d'étudier le comportement

multi-altitude des taux de luminance plus ou moins élevés selon la bande spectrale considérée. Un histogramme uni-modal et assez étroit d'une région d'intérêt étant la confirmation d'homogénéité de cette zone, toute discontinuité dans la distribution de l'histogramme serait alors révélateur de la présence d'une autre classe (Tsai, 1995). Dans notre cas ce serait un constat de non homogénéité de notre cible. Pour chaque altitude nous choisissons environ la même surface d'intérêt que l'on va réduire à chaque fois. Ainsi comme on peut le remarquer à la figure 3.4, la région C est incluse dans la région B elle même incluse dans la région A.

L'écart-type par altitude est relativement constant et petit en valeur absolue de Luminance apparente L^* pour toutes les bandes, ce qui confirme la pertinence (l'homogénéité approximative) de notre échantillon. Cette relativement petite variance absolue veut dire que les valeurs relatives dans la partie visible du spectre ont tendance à diminuer (car la moyenne des valeurs de L^* augmente avec l'altitude ce qui est dû aux augmentations des effets de rétrodiffusion). L'étude du coefficient de variation pour les trois altitudes nous donne 8% pour 0,67km, 5% pour 1,59km et 3% pour 3,17km à 550 nm. Les relativement petites valeurs du coefficient de variation pour toutes les bandes confirment l'homogénéité approximative de la cible, dans le tableau 3.3 suivant, nous avons compilé, pour toutes les bandes, les moyennes, écart-types et coefficient de variation pour cette même cible aux trois altitudes et pour la plus grande surface (« A »). Peut-être l'indicateur d'homogénéité le plus important est la variation de la moyenne pour les 3 aires A, B, et C (figure 3.4) pour lesquelles la moyenne varie de $\sim 1\%$ pour toutes les altitudes à 671 nm (bande 3) : c'est ce chiffre moyen qu'on utilise pour la caractérisation de nos cibles.

Tableau 3.3 - Statistiques d'une cible végétale commune aux trois altitudes. Cas de l'aire "A" de la figure 3.4

$(W.m^{-2}.Sr^{-1}.\mu m^{-1} * 100)$		Altitude 0,67km	Altitude 1,59km	Altitude 3,17km
Bande 1 (490,74 nm)	moyenne	591,57	1309,13	1954,03
	écart-type	48,86	62,39	53,43
	coefficient de variation	0,16	0,10	0,05
Bande 2 (549,68 nm)	moyenne	1280,91	2217,26	2481,14
	écart-type	50,97	58,74	38,17
	coefficient de variation	0,08	0,05	0,03

Bande 3 (671,3 nm)	moyenne	515,50	919,30	1277,03
	écart-type	39,76	44,70	27,70
	coefficient de variation	0,13	0,10	0,04
Bande 4 (etc.)	moyenne	1003,46	1514,57	1638,87
	écart-type	44,27	59,49	35,44
	coefficient de variation	0,09	0,08	0,04
Bande 5	moyenne	7672,72	10218,51	8256,86
	écart-type	445,44	469,98	273,88
	coefficient de variation	0,11	0,09	0,07
Bande 6	moyenne	7953,11	10567,07	8588,58
	écart-type	481,54	512,74	296,91
	coefficient de variation	0,12	0,10	0,07
Bande 7	moyenne	7157,30	9737,83	7768,12
	écart-type	459,03	447,24	266,77
	coefficient de variation	0,13	0,09	0,07

3.2.2. Données Microtops

La mesure d'AOD est primordiale pour l'analyse de l'influence de ceux-ci dans les modèles de transfert radiatif. Au sol ces mesures sont typiquement réalisées par des photomètres solaires multi-bandes (voir Holben et al., 1998, par exemple). Ces capteurs passifs prennent une mesure proportionnelle à l'éclairement solaire direct à différentes longueurs d'onde : à partir d'une connaissance des composantes moléculaires et en supposant une atmosphère horizontalement homogène (et après avoir effectué une calibration de l'instrument) on peut transformer les signaux mesurés au sol en AOD.

Le Microtops est un photomètre solaire portable de 5 canaux répartis selon le spectre VIS/PIR (Morys et al., 1996). Il a été conçu pour permettre des mesures rapides de l'intensité solaire et de calculer les AODs pour chaque canaux en fonction de l'intensité lumineuse reçue. Les mesures effectuées avec le Microtops constituent l'un de nos intrants principaux. Il se trouve aussi que c'est une mesure simple à obtenir en plus d'être un paramètre assez robuste et fiable. Cela converge vers notre idée initiale qui était de pouvoir avoir un protocole qui fonctionne de manière assez standard et opérationnel uniquement avec des images satellites (ou aéroportées) et des données d'épaisseurs optiques.

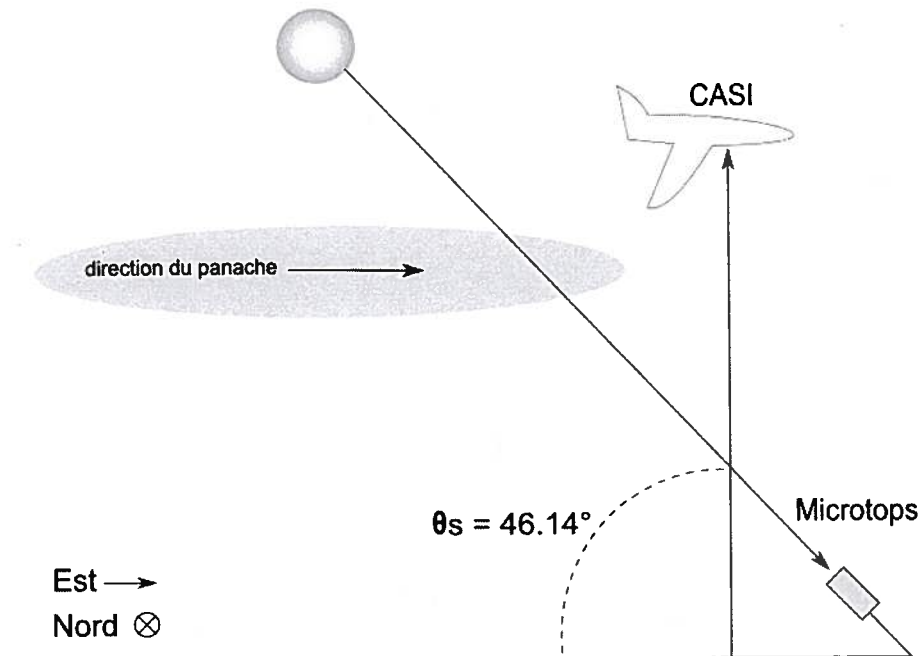


Figure 3.5 -Différence de géométrie d'acquisition entre Microtops et CASI à Saint-Jean-sur-Richelieu à 21:09 UT, heure de la plus basse altitude

Puisqu'une photodiode différente est associée à chaque canal du Microtops, les 5 mesures sont indépendante l'une de l'autre. En plus d'acquérir ces intensités solaires, le Microtops, s'il est connecté à un GPS, permet de faire un relevé de la position géographique, afin de déterminer l'angle solaire, d'estimer la pression atmosphérique et faire un relevé de l'heure universelle UT. Les deux canaux PIR de ce capteur permettant d'effectuer aussi une estimation de la colonne d'eau précipitable dans l'atmosphère (une option que nous n'avons pas utilisée étant donné que les bandes du CASI étaient largement indépendantes de l'absorption par la vapeur d'eau). Les données sont facilement transférables sous la forme de fichier texte exploitable dans tout tableur ou logiciel par la suite. En pratique, pour effectuer une mesure avec le Microtops, il faut pointer le capteur en direction du soleil afin d'avoir une collimation avec le rayonnement solaire direct. Pour réaliser les mesures Microtops il faut alors un ciel dégagé dans la direction du soleil et une orientation du capteur adaptable selon l'angle zénithal solaire. On peut alors relever le fait que les images CASI et les relevés Microtops relèvent de géométrie d'observation différente comme illustré à la figure 3.5. Ce commentaire anodin peut être toutefois

discuté dans le sens où la mesure Microtops et l'acquisition CASI vont considérer des chemins optiques différents dans une approche linéaire, qui peut dans certains cas considérer des sections de traversée du panache différentes.

Le tableau 3.4 présente les caractéristiques du Microtops utilisé pour notre collecte de donnée:

Tableau 3.4 - Bandes spectrales du Microtops

Longueur d'onde nominal de de chaque Canal (nm)	Largeur de bande (nm)
380	2,5
500	2,5
870	2,5
936	2,5
1020	2,5

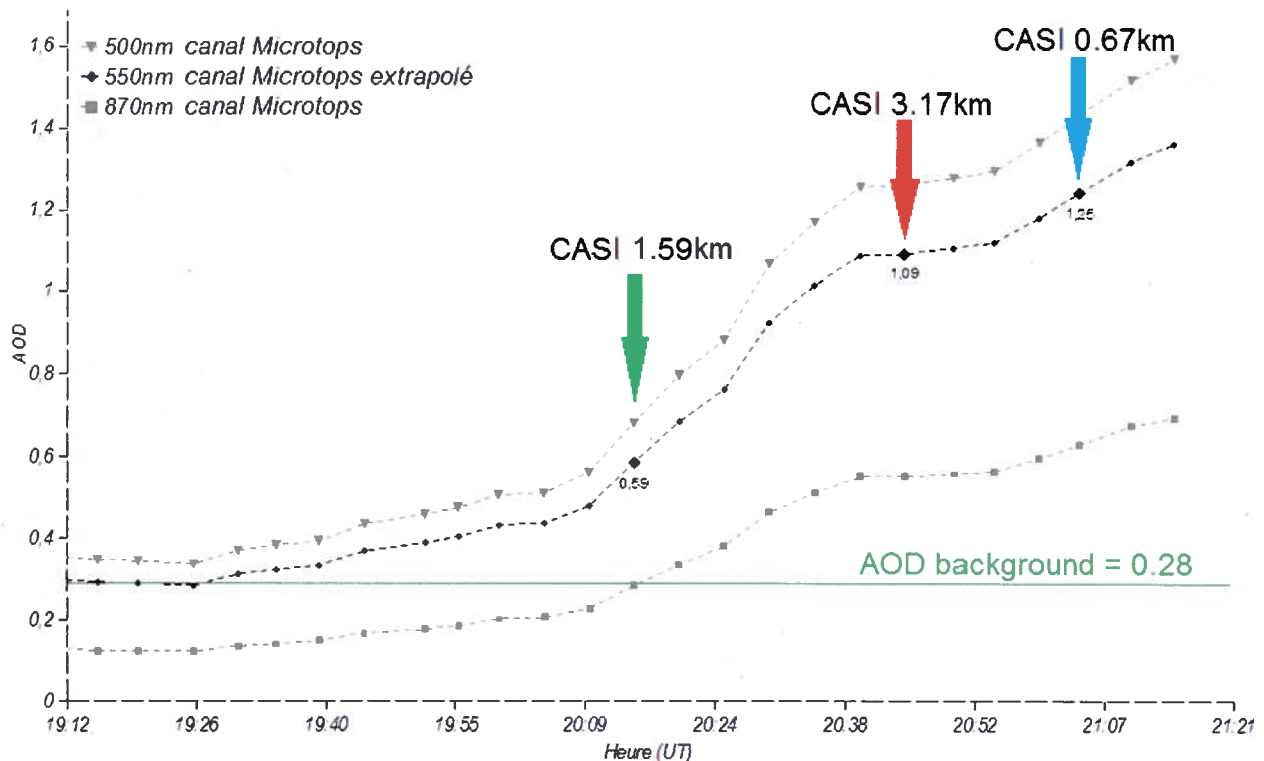


Figure 3.6 - Mesures MICROTOPS du 20 juillet 2004

La figure 3.6 montre la variation de l'AOD durant la campagne de terrain. La valeur à 550 nm (qui est la valeur spectrale habituelle servant d'intrant à notre modèle de transfert radiatif) a été extrapolée en fonction des canaux à 500 et 870 nm selon la variation linéaire des logarithmes des épaisseurs en

fonction des logarithmes des approches (variation linéaire Log-log, avec un coefficient d'Angstroëm moyen de 1,47 pour ces deux canaux). Nous avons représenté sur cette figure les heures de passages correspondant aux trois latitudes CASI. De plus, le profil d'AOD présentait durant cette journée une valeur assez constante qui a commencé à varier entre 19h00 et 20h00 UT. Cette valeur moyenne sera alors considérée comme la valeur de fond (de background) pour caractériser la situation standard de nos aérosols. En prenant compte de ces conditions standard, nous allons superposer un profil non-standard correspondant à notre panache de fumée et dont la valeur d'AOD totale de cette perturbation sera cette valeur extrapolée de l'AOD dont on aura soustrait la valeur du background :

$$AOD_{Total} = AOD_{Panache} + AOD_{Background}.$$

3.3. Modèle utilisés et modélisation principale

3.3.1. Modèle CAM5S

CAM5S est une version modifiée du modèle 5S (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) dont la particularité est de prendre en compte les capteurs hyperspectraux et les capteurs aéroportés (O'Neill et al., 1996). C'est d'ailleurs une des raisons pour laquelle il a été utilisé dans les travaux de Bergeron (2005) qui se sert de ce modèle afin de déterminer l'erreur dans l'estimât de la réflectance au sol ($dR^*(0)$) et de valider cette estimation d'erreur avec des cibles test. L'usage principal de CAM5S est de pouvoir appliquer des corrections atmosphériques à des données aéroportées ou satellitaires. Le modèle fonctionne avec un fichier standard d'intrants qui caractérisent la prise de vue, la réflectance de la cible, etc. Le modèle est capable de fonctionner en mode direct ou inverse. Le mode inverse consiste à avoir en entrée une réflectance apparente à l'altitude pour déterminer après correction atmosphérique la réflectance apparente au sol. Le mode direct, lui, exige en entrée une réflectance au sol et effectuera un calcul de la réflectance simulée à une altitude demandée. Comme nous avons accès au code de ce transfert radiatif il nous est possible de le modifier afin de modéliser correctement les conditions présentes sur notre site d'étude. On trouvera dans O'Neill et al., 1996, une description détaillée du fonctionnement général de ce modèle.

3.4. Données complémentaires

3.4.1. Imagerie satellite MODIS

MODIS est un imageur multi-bande sur une plateforme satellitaire lancé par la NASA à bord du satellite TERRA qui d'ailleurs prend aussi en charge le capteur MISR, on aura donc simultanément entre les scènes MODIS TERRA et les images MISR disponibles. Ce capteur de la NASA destiné à l'observation des surfaces et de l'atmosphère terrestre enregistre des données dans des bandes spectrales allant de $0,4 \mu\text{m}$ à $14,4 \mu\text{m}$ avec une résolution spatiale variable dont la plus basse est de 250 m et dont la largeur des images obtenues peut s'étendre jusqu'à plus de 2000 km. Les différents capteurs prennent une image complète de la Terre tous les 1 ou 2 jours et fournissent des mesures à grande échelle de phénomènes globaux. Ainsi dans un premier temps ce capteur va être utile à la localisation et la mise en contexte générale d'une zone d'étude, d'un point de vue aussi bien géographique qu'atmosphérique. De plus les différents domaines de prospection de ce capteur ainsi que les estimations de paramètres physiques de l'atmosphère et des surfaces imagées vont donner accès à tout un set de données auxiliaires comme l'estimation de l'AOD pour l'atmosphère totale, ou la localisation des points chauds (hotspots) correspondant aux feux de forêt actifs grâce aux capteurs infrarouges.

3.4.1.1 Imagerie MODIS standard

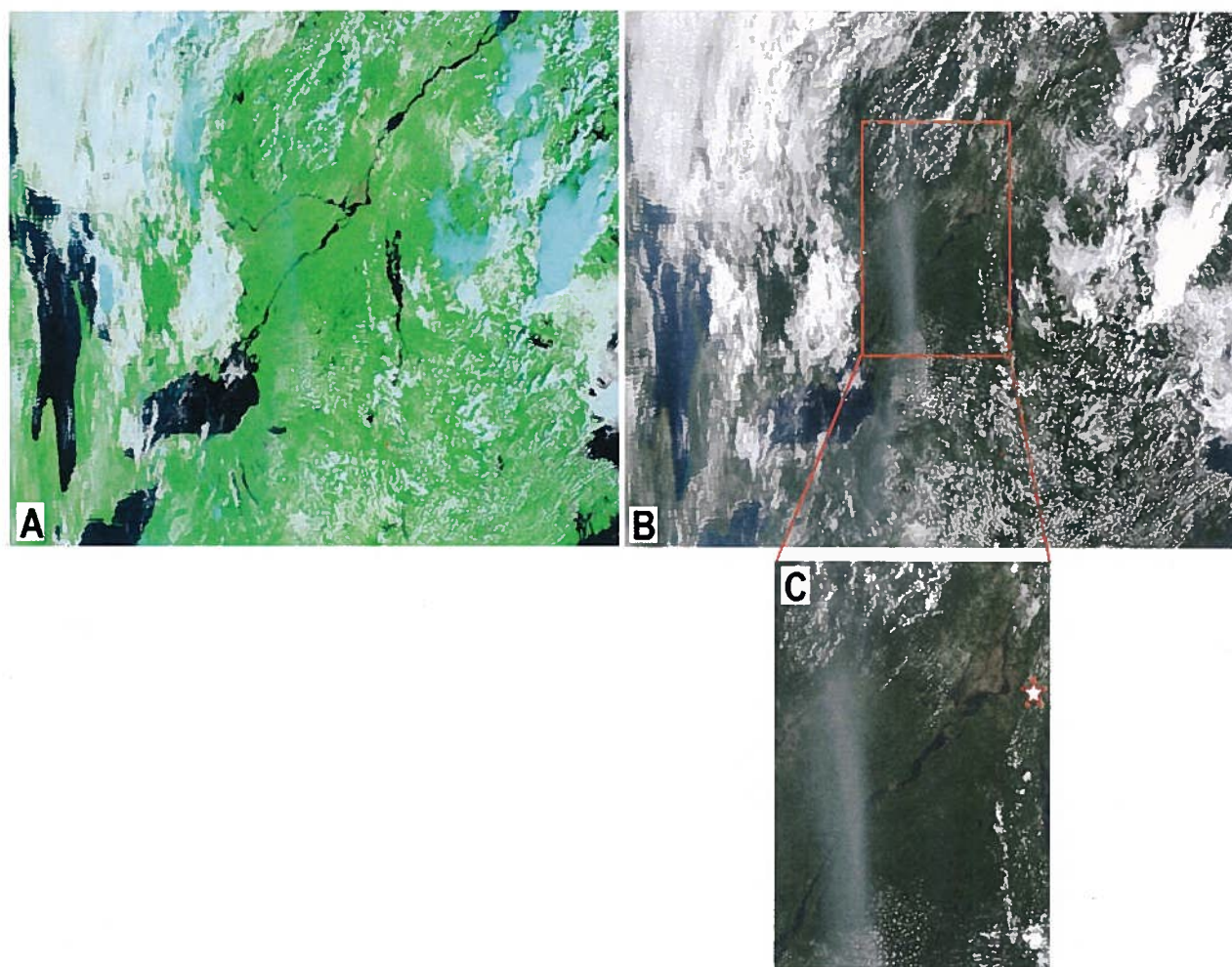


Figure 3.7 - Scène MODIS Terra du 20 juillet 2004 à 15h40. Vue générale de la zone en composition colorée des bandes (7 2 et 1): imagerie A; et en couleur vraie (bandes 1, 4 et 3): imagerie B . L'imagerie C est un zoom de la scène en couleur vraie sur le panache; on visualise bien le panache arriver sur la zone d'étude (Saint-Jean-sur-Richelieu est indiqué par une étoile sur l'imagerie C)

Les données MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) vont être dans un premier temps utilisées comme élément de visualisation globale de notre zone d'étude, la grande surface imagée par le capteur permet en effet de visualiser rapidement et de détecter assez facilement selon la couverture nuageuse la présence ou non de panache de fumée sur les images, et cela en visualisant rapidement les données en composition colorée directement accessibles via leur galerie internet. Par la suite lorsqu'un élément est repéré on peut valider la présence ou non de fumée en visualisant un des produit de MODIS à savoir GASP (Goes Aerosol Smoke Product) qui est un outil de détermination de

l'AOD utilisant de l'imagerie satellite visible et PIR (Prados et al., 2007). Ces données, bien que de résolution grossière et moins précise que des mesures photométriques ponctuelles au sol permettent au moins d'avoir une assez bonne confiance sur la présence ou non de panaches de fumée et de se faire une idée globale de leur répartition et de leur épaisseur optique (Paciorek et al., 2008). L'image MODIS présentée à la figure 3.7 a été prise le 20 juillet 2004 à 15h40. On remarque que le panache est très peu visible sur la scène générale de la sous-image A alors qu'il est nettement identifiable sur la sous-image B, ce qui est un argument appuyant le fait que le panache est constitué de particules inférieures au microns (l'AOD et la luminance produite par la rétrodiffusion de ces petites particules diminue rapidement avec l'augmentation de la longueur d'onde) et ne peut pas être confondu avec des particules provenant des nuages (grosses particules).

3.4.1.2 Produit connexes aux images MODIS:

-Carte d'AOD:

Les données AOD à 550 nm de MODIS permettent d'imager l'épaisseur optique des aérosols sur les océans et les terres au niveau mondial. Pour des données trop nuageuses l'estimation des AODs n'est pas extraite, ce qui donne un pixel noir. La résolution spatiale (taille du pixel) de ces images est de 10 km par 10 km (au nadir). Ces données constituent donc une première estimation grossière de la situation atmosphérique et surtout une mise en contexte globale des mesures effectuées à Saint-Jean-sur-Richelieu dans notre cas, ce qui va nous permettre une estimation globale plus critique des données d'AOD relevées avec le Microtops. La figure 3.8 illustre la situation en terme d'épaisseur optique des aérosols lors de notre campagne de terrain. On note tout d'abord que la scène correspond à l'image MODIS de la figure 3.7 cependant un grand nombre de pixels sont manquants et correspondent aux surfaces de l'image trop nuageuses pour déterminer l'AOD ou des pixels trop brillants. Cependant on constate que le panache de fumée est bien présent sur cette scène et que l'AOD est certainement égale ou supérieure à 1 pour 550nm. On constate aussi que le panache est aussi entouré d'un «contexte» atmosphérique qui nous fait dire que l'épaisseur optique doit progressivement augmenter à l'approche du panache, en effet les pixels bleu sombre correspondant à des AOD voisins de zéro sont assez distants de celui-ci.

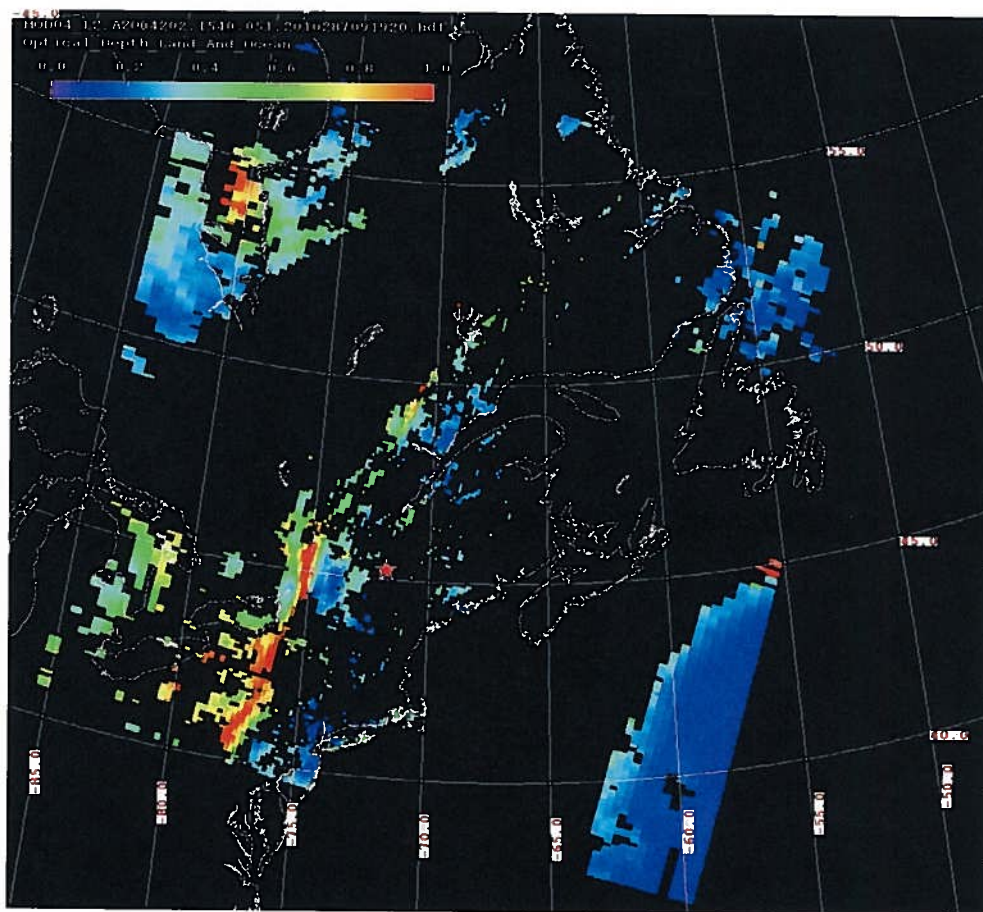


Figure 3.8 - Estimation de l'AOD à 550nm et visualisation du panache à partir de la scène MODIS Terra du 20 juillet 2004 à 15h40 UT soit près de 5 heures avant les acquisitions CASI, Saint-Jean-sur Richelieu est indiqué par une étoile. On retrouve bien le panache de fort AOD visualisé sur la scène MODIS de la figure 3.7 qui se déplace vers le Nord Est. (source: U.S. Air Quality Web Blog, UMBC. données publiées par Donna Mc Namara et Ana Prados (NOAA/NESDIS)

-Cartographie des Hotspots:

Chacune de ces cartes d'incendie accumule les emplacements des incendies détectés par MODIS à bord du satellite Terra et Aqua sur une période de 10 jours. Chaque point de couleur indique un endroit où MODIS a détecté au moins un incendie durant la période de composition. La couleur varie alors du rouge, où le nombre d'incendie est faible, au jaune, où le nombre d'incendies est important. Les périodes de composition sont référencées par leurs dates de début et de fin (en jour julien). La durée de chaque période de composition a été fixée à 10 jours.

Les images MODIS d'anomalie thermique présentent la fréquence des incendies et feux, leur localisation, et les superficies considérées, c'est cette image que nous montrons à la figure 3.9.

On remarque pour la semaine considérée qu'un grand nombre de feux sont actifs en Alaska et au Yukon mais que l'Alberta et le Saskatchewan ne sont pas non plus épargnés, ce qui va rendre d'autant plus difficile l'identification de la source. Le panache résultant à Saint-Jean-sur-Richelieu est probablement une composante résultant de ces différents feux. Nous allons alors avoir une interprétation très prudente des observations constatées à l'aide du LIDAR à la figure 3.11. Les simulations HYSPLIT nous aideront à étayer cet argument.

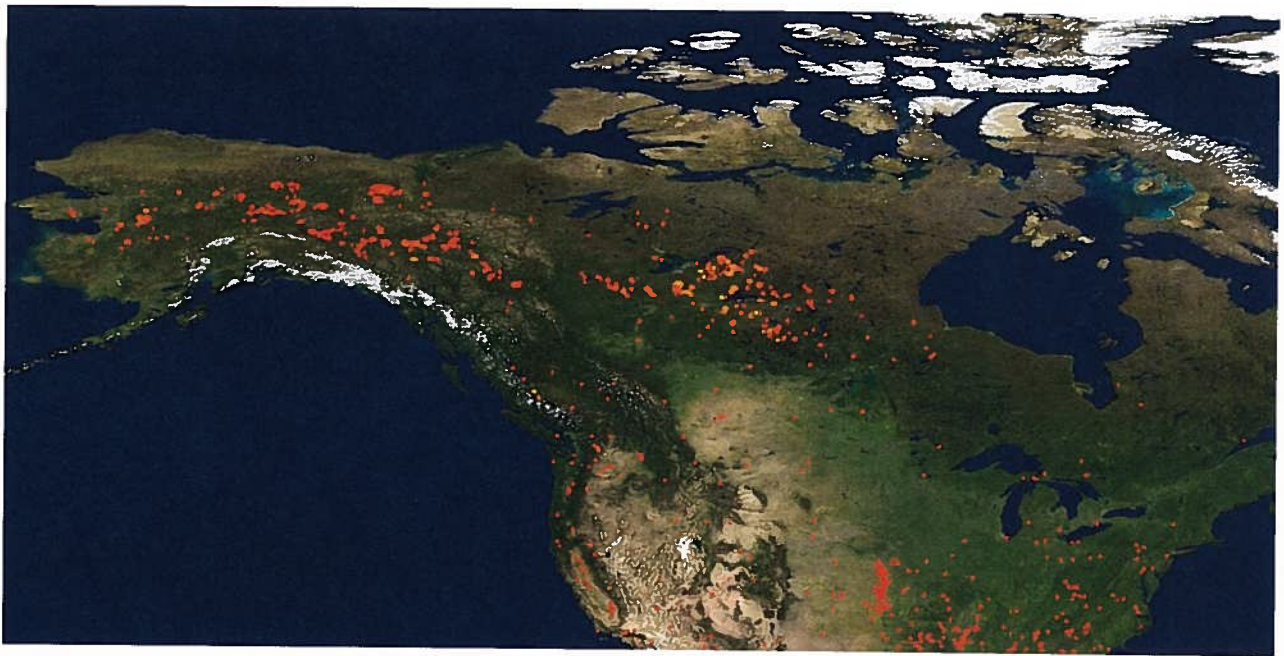


Figure 3.9 - Cartographie des hotspots obtenus avec le capteur MODIS pour la période du 19 au 28 juillet 2004 au niveau de l'Alaska et du Canada. Cette image recense les feux actifs pendant cette période suffisamment détectable par le satellite. (source: Nasa.gov, Global Fire Maps, NASA Earth data)

3.4.2. Modèle HYSPLIT et données météorologiques

3.4.2.1 *Modèle Lagrangien de trajectoire d'une particule atmosphérique*

Le Modèle HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) permet le calcul simple de trajectoires pour des parcelles d'air émises dans l'atmosphère (Draxler et Hess, 1997). Ce modèle s'appuie sur différentes bases de données météorologiques qui sont à sélectionner par l'utilisateur (ces différentes bases de données ont, par exemple, différentes résolutions spatiales et temporelles) afin de calculer la propagation d'une parcelle d'air dans l'atmosphère de manière tridimensionnelle et ce de manière rétroactive ou prospective. Dans HYSPLIT, une parcelle est déplacée géographiquement selon les bases de données anémométriques, de température, et de pression, etc. Il est possible alors de simuler la trajectoire future d'une parcelle d'air à partir d'un point géographique initial ou une trajectoire passée qui arrive à un point final. En connaissant la position et le temps d'un panache d'aérosols à partir d'un profil Lidar ou une analyse stéréoscopique de MISR on peut retracer la trajectoire du panache jusqu'au point où la parcelle a été injectée dans l'atmosphère.

Le modèle peut être exécuté directement via le Web, on peut sauvegarder les résultats ou les fichiers de données. C'est une interface facile à utiliser qui présente l'avantage d'être bien actualisé avec les bases de données météorologiques sans avoir à installer de logiciel. C'est ce mode là que nous avons retenu afin de comprendre l'historique de l'évènement de fumée qui a affecté l'analyse de nos données de Saint-Jean-sur-Richelieu. Il faut noter que ces trajectoires ont, bien sur, leur propre degré d'incertitude. On peut, par exemple, utiliser les différentes bases de données météorologiques ouvertes aux utilisateurs de HYSPLIT afin d'analyser la sensibilité des trajectoires au choix de bases de données météorologiques. Certaines bases météorologiques ne couvrent pas non plus tout le territoire, en particulier la base de données EDAS40 qui représente la base de données ayant la résolution interpolée à 40km pour l'Amérique du Nord mais qui ne couvre pas les autres régions du globe.

Ce qui va être intéressant dans l'utilisation de ces données c'est que nous pourrions pour chaque simulation partir d'un ou plusieurs points référencés selon leur latitude, leur longitude et leur altitude et effectuer une simulation de leur déplacement régressif ou progressif en fonction d'une base de données météorologiques. Ainsi, à chaque fois que nous aurons pu déterminer une source en altitude (*i.e.* l'altitude du panache de fumée) nous pourrions utiliser le modèle HYSPLIT pour essayer de déterminer sa trajectoire et savoir si elle recoupe d'autre type de données comme une zone qui serait couverte par

le capteur MISR ou un lidar atmosphérique, qui sont nos deux autres moyens à disposition pour déterminer l'altitude des panaches. Le modèle va servir aussi à comprendre les grandes dynamiques atmosphériques qui se sont déroulées durant cette période afin de mieux appréhender le contexte météorologique de notre site d'étude. On pourra directement utiliser la carte fournie à chaque simulation ou utiliser le fichier des altitudes et géolocalisations des différentes particules.

Forward trajectories starting at 2000 UTC 20 Jul 04 EDAS Meteorological Data

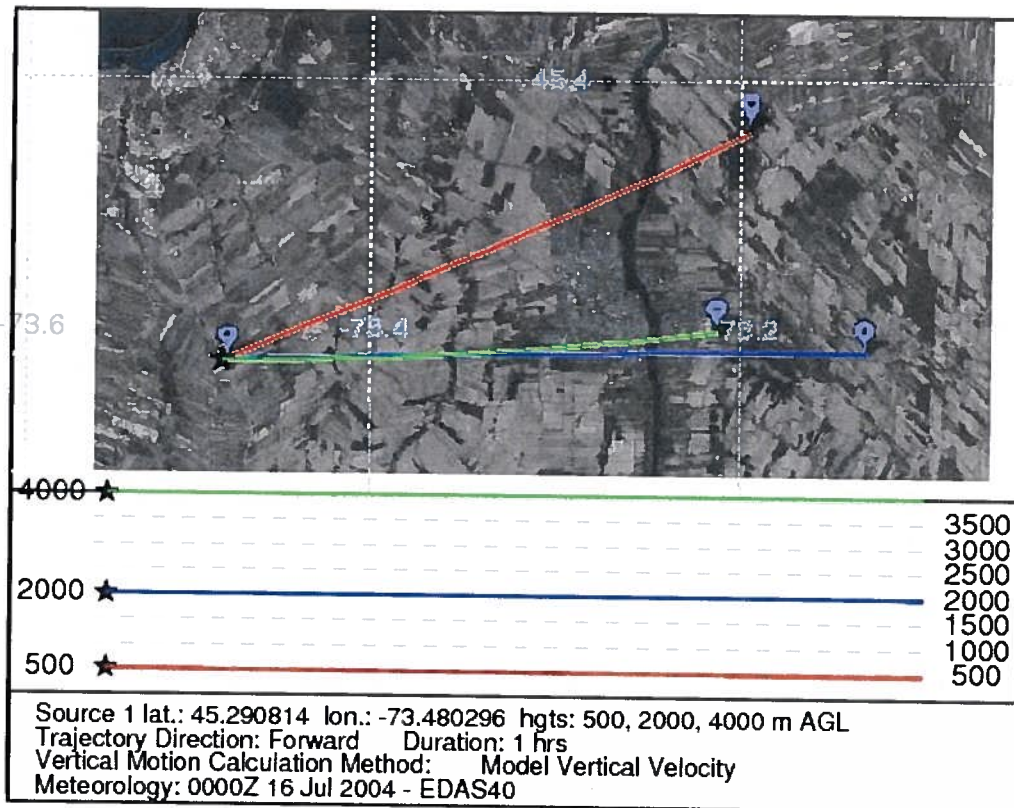


Figure 3.10 - Estimation du temps de passage du panache sur notre zone d'étude à l'aide d'une simulation HYSPLIT

En utilisant le modèle HYSPLIT on pourra effectuer des simulations de trajets de particules pour notre panache aussi bien pour retracer sa source (*i.e.* l'origine des feux), estimer son temps de parcours sur notre zone d'étude, et relier les mesures de notre zone d'étude qui va être rapidement parcourue par cette perturbation comme le confirme les distances parcourues que nous avons simulées avec le modèle

HYSPLIT et illustrées à la figure 3.10. Sur cette figure, on remarque qu'en une heure au maximum une perturbation située à 4 km d'altitude aura traversé toute la zone d'étude, les simulations ont été commencées pour 20h00 ce qui est à peu près l'heure de la première acquisition CASI.

3.4.3. Données LIDAR du réseau NOAA CREST

Le réseau de mesure de Lidar NOAA CREST est un réseau de douze Lidars répartis sur le territoire du Canada et des États-Unis. Il permet d'étudier ponctuellement les profils verticaux de coefficient de rétrodiffusion des aérosols (voir Weitkamp, 2005, par exemple, pour une discussion des éléments de base sur les mesures lidar). Une des utilités de ce réseau est de pouvoir suivre, dans la mesure du possible, et vérifier à l'aide de modèle de trajectoire, le trajet des particules et plus spécialement des panaches de fumées. En combinant les mesures Lidars avec des simulations obtenues à partir des modèles de trajectoire ainsi que l'information sur les sources, il est alors possible de retracer le comportement, et de suivre l'évolution d'un panache de fumée pour compléter les mesures photométriques locales. De plus, le Lidar permet de caractériser un profil vertical de la perturbation apportée par les aérosols et donc de permettre une relative modélisation de la colonne atmosphérique. On peut voir à la figure 3.11 un exemple de profil lidar qui montre un panache de fumée qui fait vraisemblablement partie de la même formation de fumée qui sera présente deux jours après à St. Jean. Dans ce profil LIDAR, le « backscatter cross section », c'est à dire la section efficace de rétrodiffusion varie avec la concentration des aérosols (ou les particules nuageuses) et le « particulate circular depolarization ratio » ou rapport de dépolarisation circulaire varie avec la complexité de forme et de la taille des particules (étant petit pour des particules de fumée). Une discussion plus détaillée de cette analyse LIDAR sera donnée au chapitre 4.

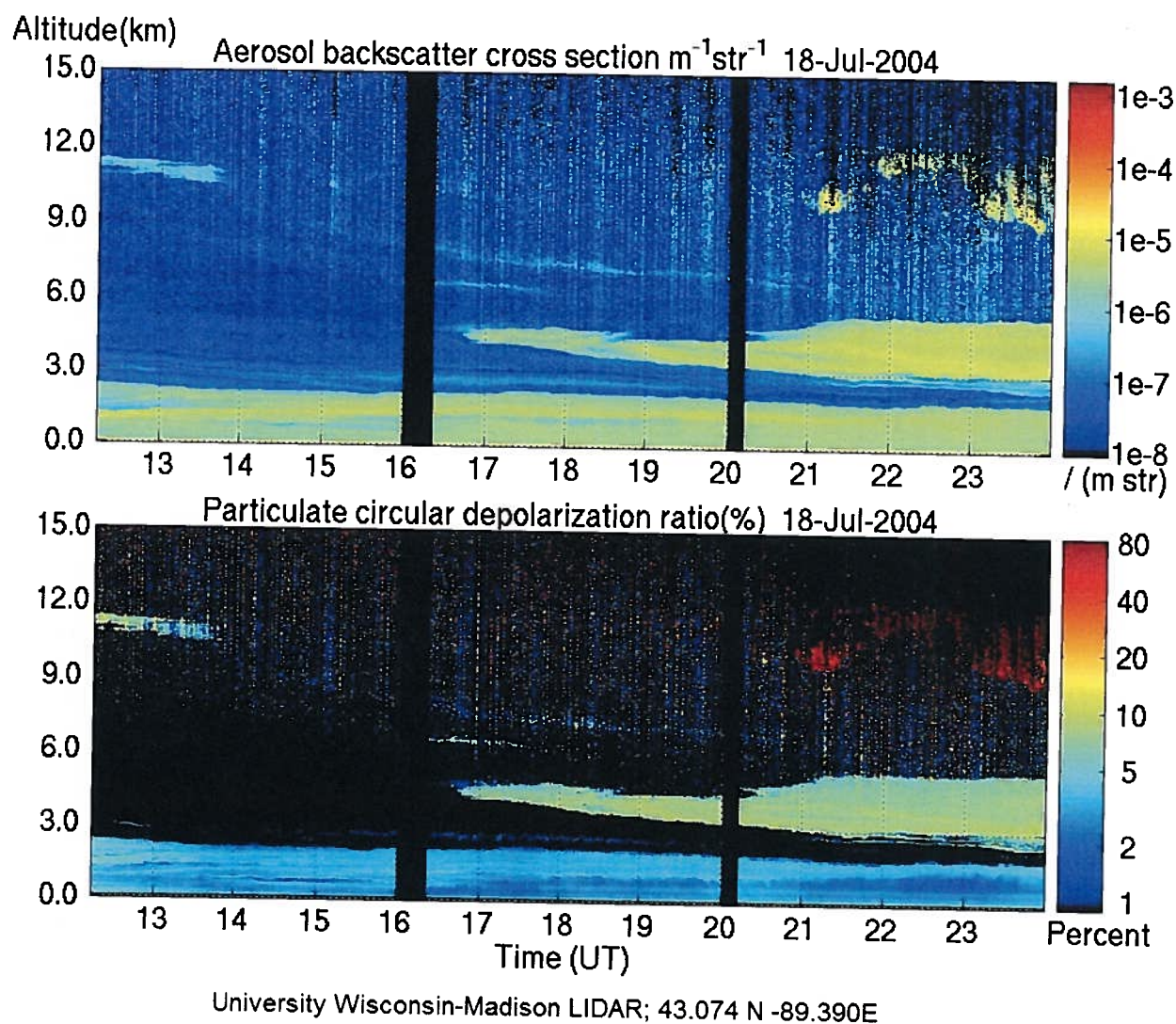


Figure 3.11 - Profil LIDAR vertical du 18 juillet 2004 (12-24h) acquis à L'université du Wisconsin (Madison) (source: NOAA CREST)

3.4.4. Données du réseau AEROCAN

AEROCAN est un réseau de photomètres solaires répartis à travers le territoire Canadien sur des sites préférentiellement choisis afin d'obtenir des mesures d'AOD pour la diversité des aérosols présents à travers le Canada. Ce réseau fait parti du réseau global AERONET (Holben et al., 1998) Il est donc possible de déterminer l'AOD comme avec le Microtops, mais cette fois le suivi du soleil et l'enregistrement des données est automatisé. Les données d'AEROCAN vont, dans un premiers temps,

nous permettre de vérifier la calibration du Microtops (la calibration des photomètres d'AEROCAN sont fait régulièrement suivant un protocole rigoureux d'AERONET). La calibration du Microtops a été fait une fois par le fournisseur (une calibration qui date de 5 ans) et donc on doit nécessairement suivre et si nécessaire corriger la calibration de cet instrument. Dans un deuxième temps les mesures de la station le plus près de Saint-Jean-sur-Richelieu (Sherbrooke, à peu près 100 km à l'est de ce dernier) nous donne une aperçu régional de la variation de l'AOD : la figure 3.12 démontre cette variation lors de la journée des survols à Saint-Jean-sur-Richelieu. Les données suivantes sont de niveau 1,0 c'est-à-dire qu'elle sont d'une part pratiquement disponibles en temps réel via le site d'AERONET et que les données sont traitées automatiquement. Ainsi les mesures sont non-vérifiées et non filtrées (des données perturbées par les nuages par exemple) et n'ont pas reçu de calibration finale.

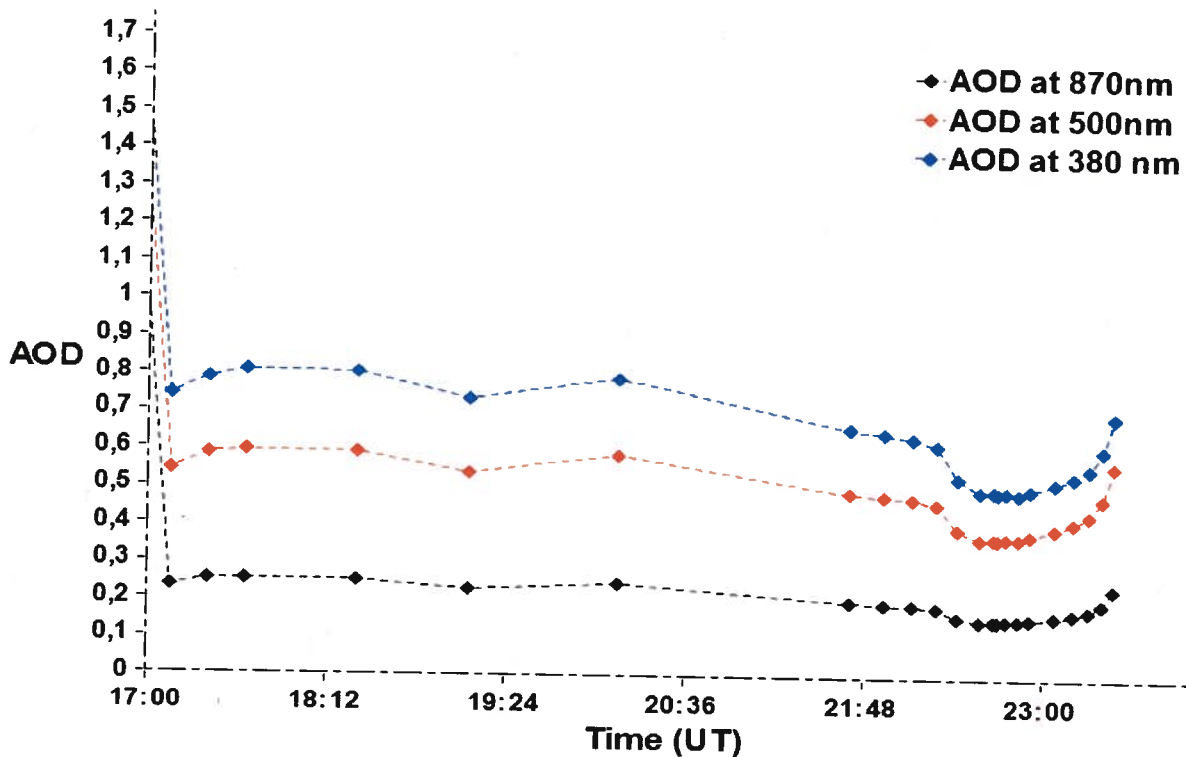


Figure 3.12 - les AODs relevées avec le photomètre CIMEL de Sherbrooke le 20 juillet 2004 pour les canaux 380, 500 et 870 nm. Les données suivantes sont de niveau 1,0 c'est-à-dire qu'elle sont non-vérifiées et non filtrées (des données perturbées par les nuages par exemple) et n'ont pas reçu de calibration finale

Pour pouvoir comparer les données du photomètre CIMEL avec le Microtops, une inter-calibration a été réalisée entre les deux capteurs, la figure 3.13 illustre les résultats obtenus pour 3 canaux.

Les données de niveau 1,0 du réseau AERONET sont directement comparables aux données Microtops car elles sont toutes deux non-filtrées. On remarque que pour les canaux qui sont le plus pertinents pour notre étude (870 et 500 nm) il y a une majoration des valeurs obtenues avec le Microtops avec une différence relative $\sim 0,02-0,03$ par rapport aux données du CIMEL (un résultat qui est à peu près de l'ordre de grandeur de l'erreur absolue citée pour le Microtops (voir Smirnov et al., 2011, par exemple). La différence importante entre les canaux à 380 nm indique vraisemblablement un problème de calibration avec le Microtops : nous n'avons pas utilisé les données de cette bande dans notre analyse.

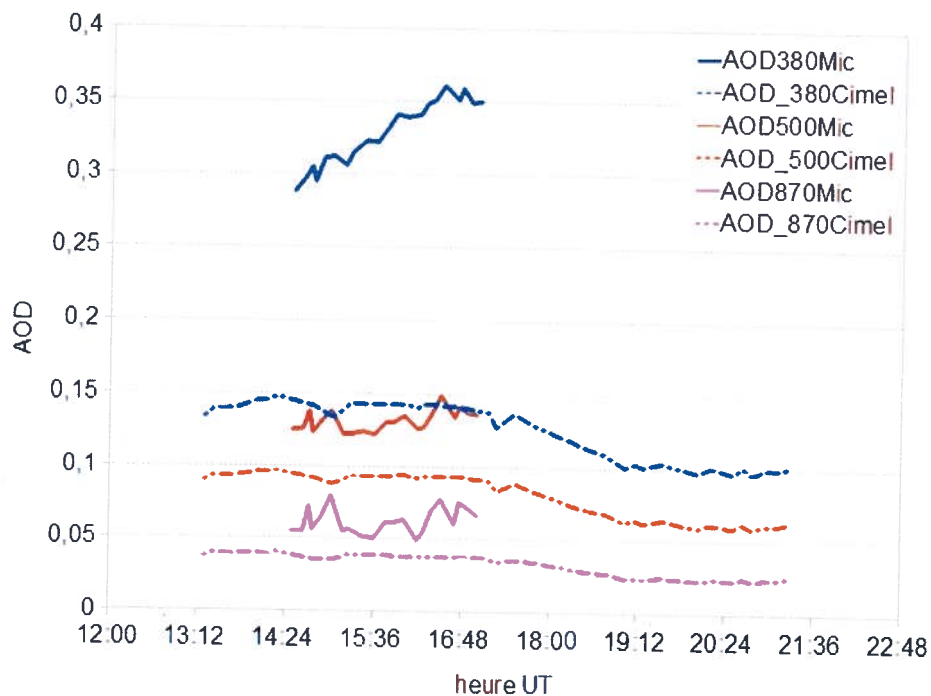


Figure 3.13 - intercalibration du 27 février 2004 entre le Photomètre CIMEL de Shebrooke et le Microtops utilisé à Saint-Jean-sur-Richelieu

3.4.5. Données multi-angulaires MISR

MISR (Multi Angular Imaging Spectro Radiometer) est un capteur embarqué sur la plateforme Terra. Sa particularité est d'acquérir la même scène à l'aide de 9 caméras distinctes orientées selon un angle différent et cela dans quatre bandes spectrales, centrées à 440, 550, 670 et 860 nm (Diner et al., 1989). Par sa fauchée minimale de 210 km et sa répétitivité de 16 jours, MISR n'a pas vocation d'être un imageur global comme le capteur MODIS embarqué sur la même plateforme, cependant l'aspect multi-

angulaire de ses données va autoriser une approche stéréoscopique qui va conduire, entre autre, à pouvoir extraire une information sur l'altitude des couverts nuageux et même les panaches de fumée lorsqu'ils sont suffisamment denses. La capacité stéréoscopique des données MISR qui couvrent spatialement des zones beaucoup plus larges que le réseau de Lidar de CREST va permettre de retracer des panaches et d'avoir une estimation de leur altitude lorsqu'ils sont suffisamment détectables. En cumulant ces résultats à des modèles de transport particulaire comme HYSPLIT, ces données vont être un moyen supplémentaire pour cartographier spatialement et géographiquement des événements atmosphériques telle que la propagation d'un panache de fumée.

Le tableau ci-contre récapitule les caractéristiques du capteur.

Tableau 3.5 - Caractéristiques principales des données MISR

répétitivité	Tous les 9 jours, en fonction de la latitude (plus de recouvrement polaire)
fauchée	360 km pour les 9 caméras
Angle des caméras	L'angle négatif désigne un angle en arrière du sens de propagation du capteur (aft) positif en avant (forward): Da(-70,5°), Ca(-60,0°), Ba(-45,6°), Aa(-26,1°), An(nadir), Af(26,1°), Bf(45,6°), Cf(60,0°), Df(70,5°).
Couverture spectrale	4 bandes: bleu(446nm, FWHM=44nm), vert(558nm, FWHM=22nm), rouge(672nm, FWHM=22nm), proche IR(867nm, FWHM=36nm)

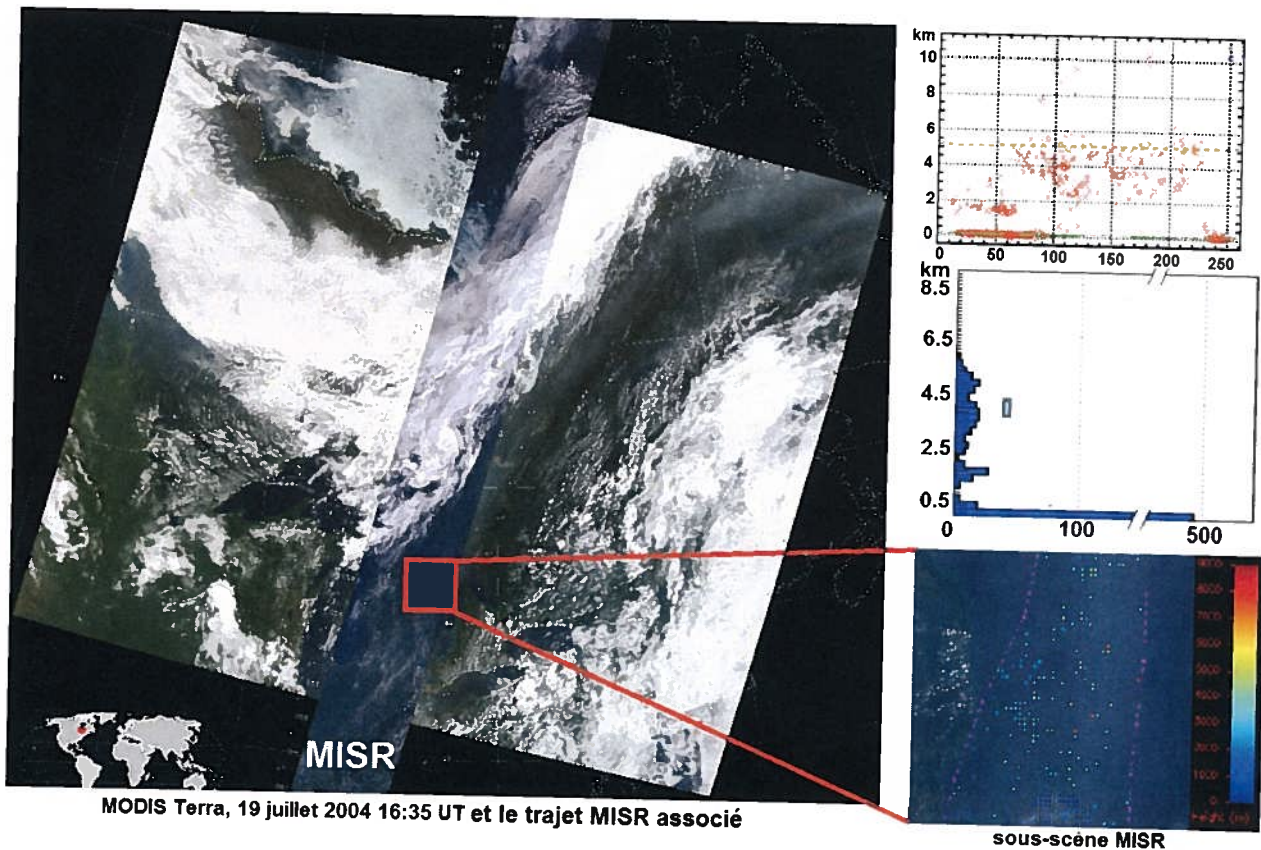


Figure 3.14 - Détermination de l'altitude du panache de fumée sur l'image MISR du 19 juillet 2004. *L'image correspond à une sous-image sous la bande de nuage vue dans l'image MISR générale représentée sur la scène MODIS ci-contre*

La figure 3.14 montre une image MISR (vue au nadir) localisée à l'intérieur d'une image MODIS (comme indiqué ci-dessus, MISR et MODIS acquis simultanément des images à bord du satellite Terra) un jour avant l'arrivée du panache à Saint-Jean-sur-Richelieu). Une discussion plus approfondie de cette figure (et surtout de la méthode d'extraction du profil d'un panache) est reportée au chapitre 4.

4. Analyse et résultats, Modélisation verticale du panache

Les différents processus de paramétrisation de notre atmosphère non standard sont décrits dans cette section. On décrit les modifications apportées à CAM5S pour modéliser le panache de fumée, et on déterminera la modélisation du panache la plus adéquate que nous confronterons à nos données afin d'obtenir les réflectances apparentes au sol. Conjointement à cette modélisation nous devons déterminer quelle est la part de l'AOD totale mesurée qui sera attribuée à notre panache de fumée.

On prouve la robustesse de la modélisation quand à la réponse du modèle CAM5S, c'est à dire qu'une famille de panaches sera solution si les résultats (les $R^*(0)$ de validation) sont peu modifiés par un important changement du profil du panache, en quelque sorte cela revient à effectuer une analyse de sensibilité du panache sur la réponse des données. Mais la solution de modélisation retenue sera celle qui correspondra aussi à la détection du panache effectuée avec les données auxiliaires, puisqu'il faut garder une certaine cohérence avec notre modélisation et les multiples données que nous avons.

Pour la considération des aérosols, on justifie le type d'aérosols déterminé et pourquoi ce sont ceux là que nous choisissons pour ce modèle, nous avons des aérosols de feux de forêt qui correspondent à un modèle déjà implémenté dans CAM5S. On conserve alors une expression simple du panache en terme de variation de la colonne verticale de l'épaisseur optique au capteur. Ainsi on effectuera un approfondissement sur cette étude et nous comparerons les différents modèles d'aérosols c-à-d de la fonction de phase des aérosols. La fonction de phase est un paramètre important pour le calcul du transfert radiatif. Pour la diffusion moléculaire (diffusion de Rayleigh), il s'agit d'une simple fonction analytique, qui décrit la fraction du rayonnement diffusé selon une direction donnée. En ce qui concerne les aérosols elle va aussi déterminer la diffusion et donc les caractéristiques du rayonnement perçu à la cible, mais la taille et le type d'aérosol va contrôler l'allure de cette fonction, c'est pourquoi il est important de bien caractériser le type d'aérosols présent dans une atmosphère donnée.

Les résultats valideront aussi le choix d'aérosols que nous avons fait, car des aérosols de feux de forêt correspondront à un meilleur ajustement des luminances apparentes, ce qui est en quelque sorte en accord avec la détermination (feux de forêts) de la source obtenue avec HYSPLIT et les «hotspots» cartographiés sur les images MODIS par exemple.

L'application d'une correction atmosphérique sur nos données avec le modèle CAM5S donne des résultats aberrants avec les $R^*(0)$ puisque le transfert radiatif utilisé s'appuie sur une modélisation standard de l'atmosphère comme décrite selon Elterman, 1970. N'ayant pas d'information sur le type d'aérosols, leur taille et composition, nous allons conserver les conditions standard du modèle CAM5S pour nos conditions d'utilisation. Nous sélectionnons donc un modèle d'aérosols de feux de forêt pendant la période estivale en moyenne latitude (*i.e.* en anglais : biomass burning aerosols type, midlatitude summer model) Une section plus détaillée de ce modèle est présenté à la section 4.3.1.

En d'autre termes avec cette modélisation nous approchons la paramétrisation la plus proche de nos conditions atmosphériques ce qui permettra de limiter les erreurs sur les valeurs obtenues. Si en parallèle nous arrivons à modéliser correctement le profil de notre panache de fumée nous pourrons obtenir une évolution correcte des $R^*(0)$ en fonction des valeurs relevées dans les images CASI avec cette paramétrisation.

4.1. Interprétation des mesures du Microtops

4.1.1. Détermination de l'AOD de fond

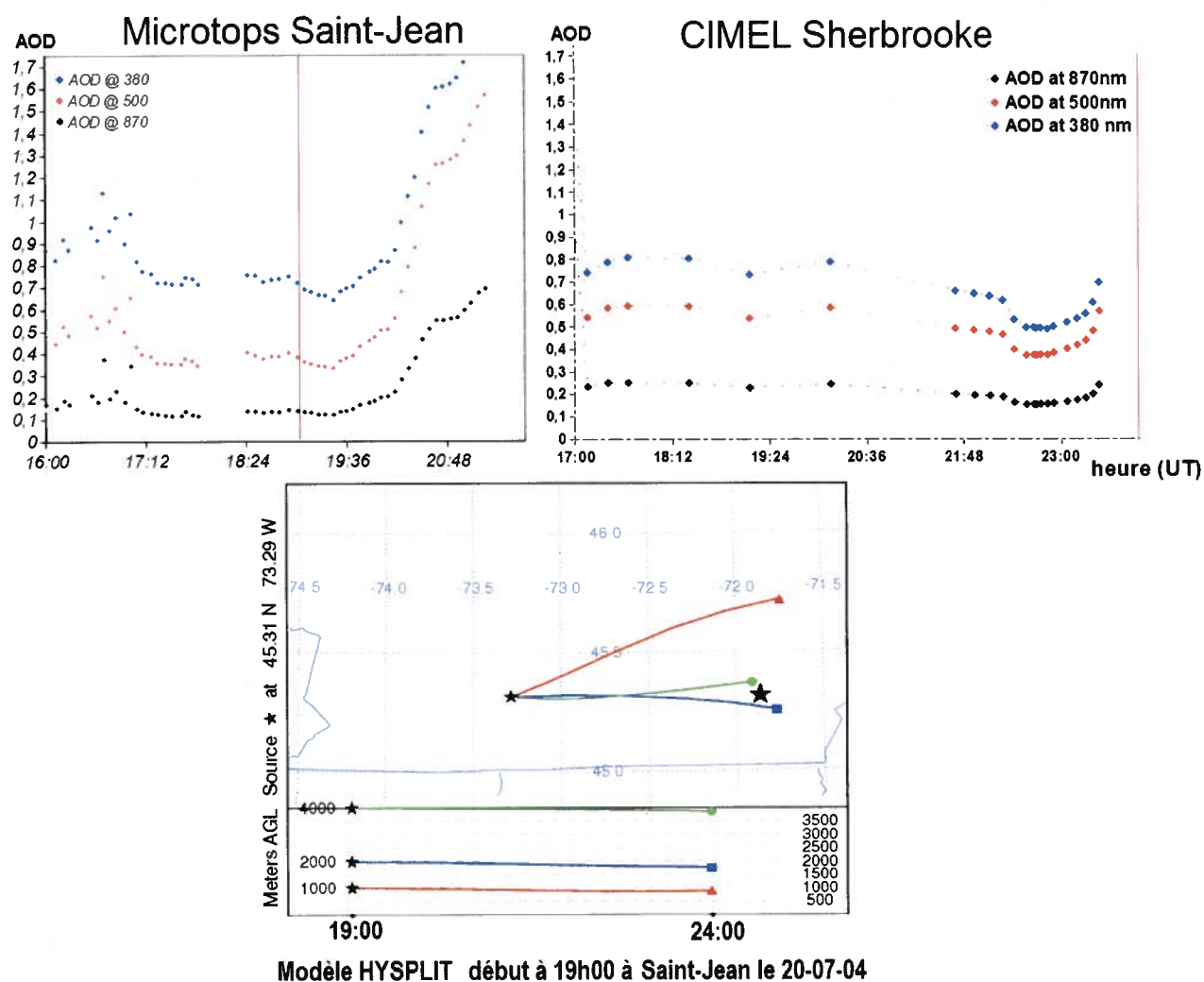


Figure 4.1 - Données Microtops et CIMEL du 20 juillet 2004 et simulation HYSPLIT

On veut déterminer quelle serait, sans la présence de ce panache, la valeur de l'épaisseur optique de l'atmosphère standard, pour cela nous avons les mesures Microtops, les données du photomètre solaire CIMEL de Sherbrooke, qui fait partie des données AERONET, et l'image MODIS des AODs ; cette dernière qui donnera un contexte plus grossier mais permettra une compréhension plus générale de la situation atmosphérique. Pour relier les données du photomètre solaire d'AERONET de Sherbrooke avec les données observées à Saint-Jean on effectue une simulation HYSPLIT entre ces deux points. Nous montrons à la figure 4.1 les résultats obtenus avec cette simulation ainsi que l'allure des AOD relevés à Sherbrooke et Saint-jean-sur-Richelieu. On peut remarquer que les courbes ont une allure similaire et, on peut spéculer que globalement l'augmentation des AODs observée passé 19h30 avec le Microtops se retrouve sur les données CIMEL à partir de 23h00. Ce qui peut sembler comme étant trop avancé au regard de la simulation HYSPLIT qui prévoit un trajet de 4 heures séparant les deux points (Saint-Jean et Sherbrooke) pour une particule à une altitude de 4km. Cependant le modèle nous donne une localisation verticale des particules alors que les mesures photométriques tiennent compte de l'angle solaire. L'angle solaire à 19h00 à Saint-Jean-sur-Richelieu est de 54° mais il sera de 13° à 23h00 pour Sherbrooke, ce qui veut dire que dans le cas d'atmosphère non standard les données du photomètre de Sherbrooke pourront être affecté par des événements atmosphériques non locaux s'ils sont suffisamment haut dans l'atmosphère. Par exemple il pourra capter à 13km de distance un panache de fumée s'il est situé à 3 km d'altitude. De plus on remarque que des particules plus basses dans l'atmosphère parcourront un distance plus grande. Au regard de ces approximations on peut globalement associer les deux hausses respectives des AODs dans les mesures Microtops à 19h00 et celles de Sherbrooke à 23h00.

4.1.2. Extrapolation des mesures Microtops pour 550nm

Pour interpréter correctement les mesures il faut se placer dans notre cas particulier avec présence de panache de fumée. Dans ce cas là le comportement des épaisseurs optiques ne fonctionne pas comme dans une approximation classique d'Angström et nécessite un fit polynomial de degré 2 de la variation log/log des AOD en fonction des longueurs d'ondes (Alakian et al., 2007 ; King et Byrne, 1976).

En ce qui concerne uniquement les mesures relevées avec le Microtops pour les 5 canaux, si nous appliquons une extrapolation linéaire aux valeurs logarithmiques d'AOD que nous avons montré à la figure 3.6) en respectant les deux formulations suivante :

$$AOD = \beta \lambda^\alpha$$

(4.1.1a)

ainsi que la formulation de 2ième ordre:

(4.1b)

$$\log AOD = a_1 + a_2 \log \lambda + a_3 \log \lambda^2$$

nous obtenons les valeurs d'AOD à 550 nm indiquées dans le tableau 4.1 suivant pour les 5 AODs acquis par le Microtops à chacune des 3 altitudes (on rappelle que les temps indiqués par les flèches à la figure 3.6 correspondent aux temps d'acquisition de chaque image CASI). Mathématiquement, s'il n'y a pas ou peu de différence entre les résultats obtenus par les deux formulations c'est que l'on se trouve dans un cas d'approximation classique d' Angström. À l'inverse si la différence est notable c'est que nous sommes probablement en présence d'aérosols correspondant à de la fumée.

Tableau 4.1 - Extraction de la valeur des AOD à 550 nm pour le 20 juillet 2004 aux heures de survol du CASI

Canal Microtops (nm)	Altitude 1,59km			Altitude 3,17km			Altitude 0,67km		
Heure de survol	20h11 UT			20h47 UT			21h09 UT		
380	0,996			1,621			1,872		
500	0,681			1,281			1,519		
870	0,283			0,558			0,675		
936	0,256			0,492			0,596		
1020	0,229			0,426			0,518		
Valeur extrapolée à 550 nm par interpolation linéaire	0,586			1,095			1,246		
Valeur extrapolée à 550 nm Interpolation polynomiale de degré 2	0,582			1,133			1,349		
Différence constatée entre les deux extrapolations	-0,003			0,038			0,103		
Coefficient a_1 a_2 a_3 du polynôme de degré 2: $\log AOD = a_1 + a_2 \log \lambda + a_3 \log \lambda^2$	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
	-0,062	-0,713	6,438	-0,626	6,678	-17,093	-0,678	7,402	-19,398

Nous montrons les extrapolations polynomiales de second ordre dans la figure 4.2 appliquées sur les profils d'AOD obtenus lors du 20 juillet. Comme attendu selon les différences constatées dans le tableau 4.1 on constate que les altitudes les plus tardives (3,17 et 0,67km) n'ont pas une allure linéaire sur un graphique log-log. La différence entre les deux méthodes d'extrapolation montre clairement que les situations atmosphériques (effectivement les distributions de taille des aérosols) sont différentes. Si un comportement polynomial de degré 2 trahi la présence d'un panache, celle-ci est clairement constatée avec la différence de 0,1 pour la plus basse altitude, un peu moins pour l'altitude de 3,17km et pratiquement pas pour l'altitude de 1,59km puisque la sensibilité du Microtops est au delà de la différence calculée. Nous rappelons que nous utilisons uniquement les canaux à 500 et 870 nm pour extrapoler la valeur à 550nm

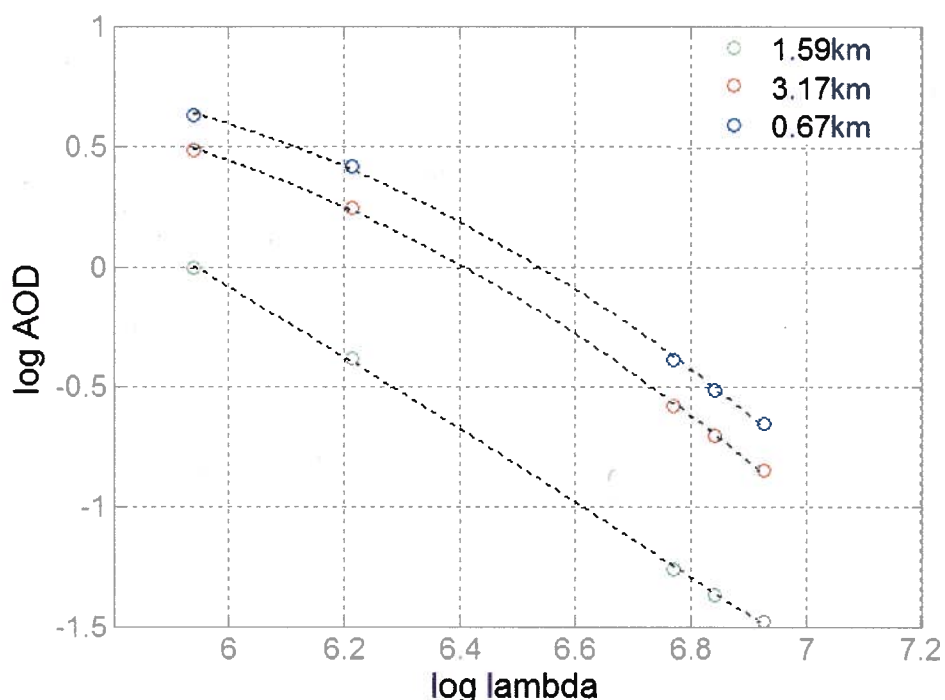


Figure 4.2 - Profils des AOD versus lambda pour les 3 altitudes CASI

À la vue de ces résultats on peut se demander s'il ne faudrait pas minimiser l'impact de la présence du panache pour l'altitude intermédiaire à 1,59km puisque nous constatons un comportement linéaire des AODs sur une échelle log-log. Ce qui pourrait être alors interprété comme une considération d'un AOD faible pour le panache en respectant la même modélisation des aérosols qui constituent celui-ci et toujours la même valeur d'AOD de background.

Il faut rester prudent cependant car cette constatation est une réalité pour le seul point de mesure (la localisation géographique du Microtops pendant la prise de mesure) que nous avons et qui correspond à un emplacement situé dans le dernier tiers de nos images CASI. La question est de savoir si nous pouvons extrapoler ce raisonnement à l'ensemble de l'image, c'est ce que nous discutons dans les conclusions de l'Annexe 4 -.

Faire les corrections atmosphériques sans tenir compte du panache de fumée pour l'altitude de 1,59km est assez simple puisqu'il suffit de faire fonctionner le modèle avec une valeur d'AOD de background suffisamment conséquente; d'ailleurs les données Microtops ainsi que les données AERONET et MODIS nous permettent de penser que l'AOD de background se situerait autour de 0,28 à 550 nm comme on peut le voir à la figure 3.6 suivante avec les données Microtops.

4.2. Modélisation du panache dans CAM5S

Le panache de fumée que nous avons observé à St. Jean n'est pas pris en compte par le modèle de variation vertical des aérosols dans la version originale de CAM5S (où on présume une variation verticalement monotone). Ceci nécessite une modification de la formulation physique interne du modèle afin d'incorporer cette perturbation atmosphérique. Cette adaptation du modèle nous permet de comprendre la dynamique du transfert radiatif (surtout pour les grandes variations temporelles) pour notre cas ponctuel et, en fin de compte, de faire converger les quantités physiques qui caractérisent notre site d'étude. Une première étape a donc consisté à déterminer l'altitude de notre panache ce qui a été fait grâce aux données MISR, de plus si l'on peut déterminer l'épaisseur du panache on va pouvoir commencer une modélisation de celui-ci. Ainsi, un choix simple et facilement paramétrable nous a orienté vers une allure gaussienne du panache (Islam, 1999) que nous avons exprimé en terme du coefficient d'extinction et ensuite en terme d'épaisseur optique des aérosols (à partir du sol) dans le modèle CAM5S. Une modélisation gaussienne nécessite deux paramètres d'entrée à savoir le centre de la distribution et son écart-type. La formulation de ce panache est schématisée et documentée dans l'annexe 1. Pour avoir une idée de l'épaisseur du panache présent sur notre zone d'étude on s'est servi à la fois des résultats de MISR et d'un profil Lidar du réseau CREST. Effectivement, si on arrive à détecter l'altitude du panache avec les données MISR, on a une information approximative quant à la position et l'étendue verticale du panache. De plus les simulations HYSPLIT détaillées dans l'annexe 2 ainsi que les images GASP nous ont montré que le panache était suffisamment étendu horizontalement et provenait d'une région relativement éloignée. Il aurait ainsi survolé une région plus au sud où un

Lidar du réseau CREST, celui de Baltimore, a permis d'imager son profil. On a montré, dans l'Annexe 1 - le profil évolutif du panache gaussien (en termes du coefficient d'extinction) et l'accroissement de l'épaisseur optique des aérosols à partir de la surface. La valeur de l'AOD du panache s'exprime en terme d'intégration du coefficient d'extinction κ_a .

En ce qui concerne le panache, les données les plus proches de notre terrain seront une scène MISR prise la veille au dessus du Lac Huron (CANADA) et une image LIDAR du 18 juillet 2004 du LIDAR de l'université du Wisconsin à Madison (USA) que nous avons montré à la figure 3.11.

Deux simulations HYSPLIT montrées à la figure 4.3 nous permettent de retracer le panache de fumée du 20 juillet en deux étapes sur deux jours, avant son arrivée sur notre zone d'étude. Il passerait effectivement à proximité de la zone de feux relevés sur l'image MODIS des feux de forêt et ferait probablement partie d'une masse plus dense de fumée de feux de forêt présente sur cette zone et faisant partie de cette formation que l'on a pu relever sur le profil LIDAR de Madison ; c'est pourquoi l'image Lidar va être une première estimation grossière de l'altitude du panache et les extractions le jour suivant sur l'image MISR seront une confirmation plus précise de sa morphologie (*i.e.* son altitude). En effet notre simulation HYSPLIT correspondante ne nous permet pas d'affirmer que le panache détecté à Madison aurait la même morphologie à saint-Jean-sur-Richelieu même si le modèle nous prédit des écoulements laminaires et stables qui permettent une conservation des altitudes du panache. La raison principale est que le trajet HYSPLIT est bien trop distant du LIDAR de Madison, que la formation de fumée couvre toute cette zone est une certitude, mais il serait hasardeux de considérer qu'elle soit morphologiquement comparable. L'utilisation de l'image LIDAR est assez problématique puisque la simulation HYSPLIT montre un trajet beaucoup plus au Nord que la position du LIDAR (représenté par une flèche) mais par contre l'altitude est très bien identifiée sur l'image et montre un panache bien homogène situé entre 2 et 5 km. De plus la scène MODIS correspondante montre que la zone est largement couverte par un panache de fumée. l'hypothèse la plus probable alors c'est que le panache que nous avons à Saint-Jean-sur-Richelieu proviendrait d'un plus grand panache de cette zone, qui se serait désagréé au fil de sa progression. En fonction de cela on pourra se permettre de modéliser un premier panache de fumée que nous pourrons modifier par la suite en fonction des résultats du fit des luminances simulées avec les luminances CASI.

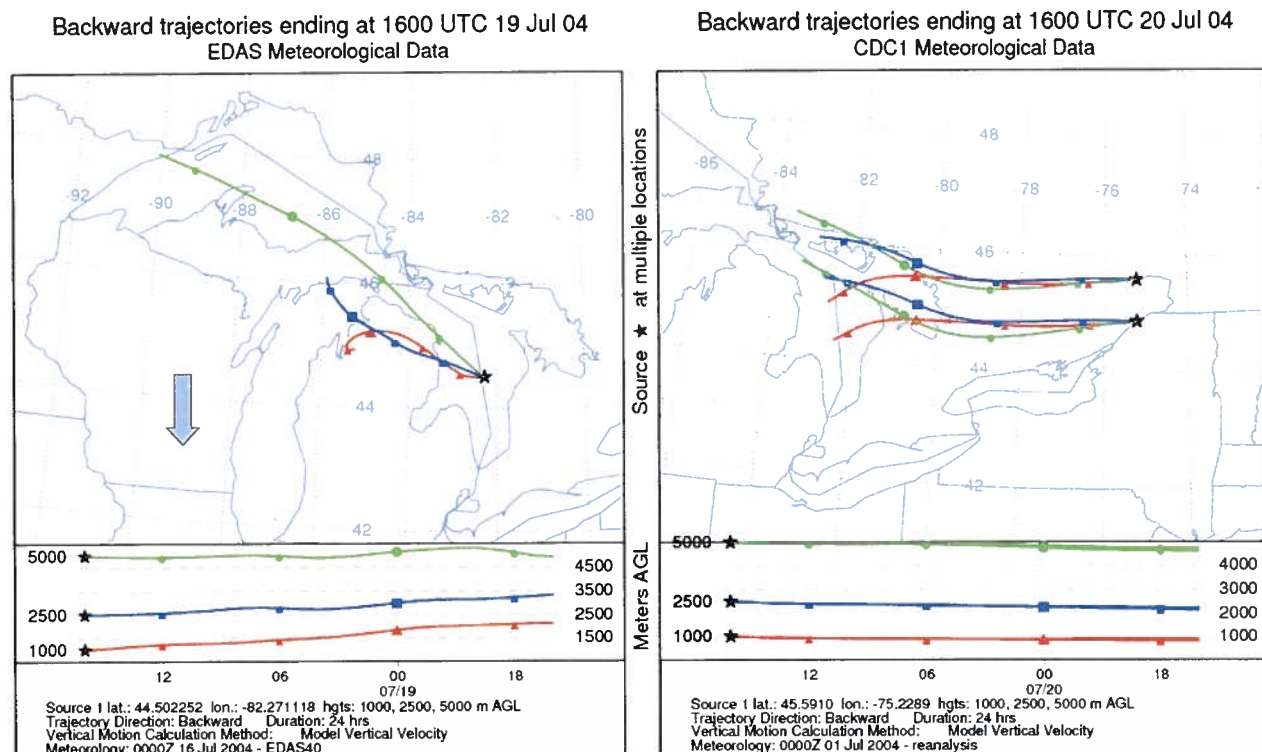


Figure 4.3 - 2 simulations HYSPLIT pour retracer le panache sur la scène MISR du 19 juillet et l'image LIDAR du 18 juillet. (Source web HYSPLIT)

La Figure 4.4 montre ce que nous avons obtenu avec l'image MISR du 19 juillet. On rappelle que l'extraction des altitudes MISR se fait à l'aide d'un logiciel spécifique développé par la NASA (le logiciel MINX). Ce logiciel utilise les 9 caméras embarquées du capteur MISR pour extraire une altitude d'un même objet détecté sur chacune d'elles. L'utilisation de l'obliquité des caméras améliore la sensibilité de détection de panache de fumée en raison de la plus longue traversée du chemin optique à travers l'atmosphère. La combinaison des données multi-angle et l'information multispectrale aide à distinguer la fumée des nuages (bande bleue plus sensible aux aérosols de fumée par exemple) ou d'autres types d'aérosols (Mazzoni et al., 2007). La nature stéréoscopique des données MISR permet un traitement des données opérationnel en déterminant la parallaxe géométrique (déplacement horizontal) qui se produit pour un panache donné en raison de son altitude au-dessus de la surface. La détermination est facilitée par l'altitude modérément élevée et des algorithmes de photogrammétrie, développés spécifiquement pour MISR utilisant les 9 caméras, dérivent de ces parallaxes les hauteurs des nuages ou panaches. La technique est purement géométrique, et une précision équivalente est

attendue pour l'extraction des altitudes de panaches de fumée, des nuages, ainsi que des poussières et panaches volcaniques. Ces altitudes sont systématiquement récupérées et rapportées sur une grille de résolution de 1,1 km géolocalisée ainsi que reportée dans un histogramme des hauteurs retrouvées sur l'image MISR. C'est cette donnée que nous avons reporté à la figure 4.4. On ne peut pas vraiment tenir compte des altitudes mesurées au dessus de 7 km car elle peuvent correspondre à des nuages, de plus de nombreux pixels au sol sont détectés par cette méthode certainement parce que l'épaisseur optique du panache n'étant pas homogène et pour des valeurs faibles d'AOD, MISR doit arriver dans les limites de la détection des «objets» en altitude. Ainsi une forte proportion de pixel va aussi correspondre aux pixels détectés au sol dans le cas d'objets qui ne seront pas suffisamment denses et donc détectables en altitude. Cependant les altitudes relevées de 7 à 2 km correspondent bien à ce que nous observons aussi sur l'image LIDAR du 18 juillet. L'apparence bi-modale des panaches seront prise en compte lors de notre modélisation du profil vertical de fumée (voir l'annexe 1) et l'annexe 5 pour le code FORTRAN correspondant à la modélisation de cette perturbation.

Histograms for Region: 024369-B44-S

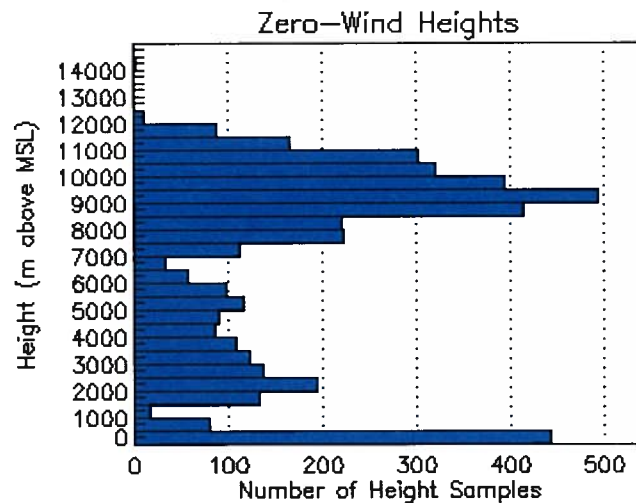


Figure 4.4 - Extraction d'altitude sur la scène MISR du 19 juillet 2004

Un autre set de donnée LIDAR va nous permettre d'appuyer ce résultat. En effet, le LIDAR de l'université de Baltimore (UMBC) nous fourni le profil illustré à la figure 4.5 du coefficient d'extinction pour le 20 juillet 2004. Si on effectue une simulation HYSPLIT que l'on montre à la figure 4.6 pour des particules situées entre 4 et 3 km prenant comme point de départ le LIDAR de Baltimore et Saint-Jean-sur-Richelieu, on se rend compte que les trajets proviennent de sources similaires par le fait qu'elles finissent par emprunter les mêmes trajets. Or le LIDAR de Baltimore fait apparaître une formation au

niveau de 3.2km d'altitude, ce qui serait en accord avec la modélisation que nous voulons entreprendre. Ces données viennent alors renforcer nos estimations, cependant on restera prudent face à toute autre interprétation de ce profil, car en effet l'apparence du panache à Baltimore est presque simultanée à son apparence à Saint-Jean-sur-Richelieu, or le panache tel qu'imagé en terme D'AOD sur la scène MODIS à la figure 3.8 ne serait pas présent sur la zone de Baltimore en même temps qu'à Saint-Jean. C'est sans doute une perturbation antérieure mais probablement similaire à celle que nous étudions. En terme de proximité avec les « Hotspots » relevés sur l'image MODIS montrés à la figure 3.9, on peut faire un lien entre ces sources de feux, les simulations HYSPLIT estimant leur propagation (figure 4.6) et ces altitudes relevées.

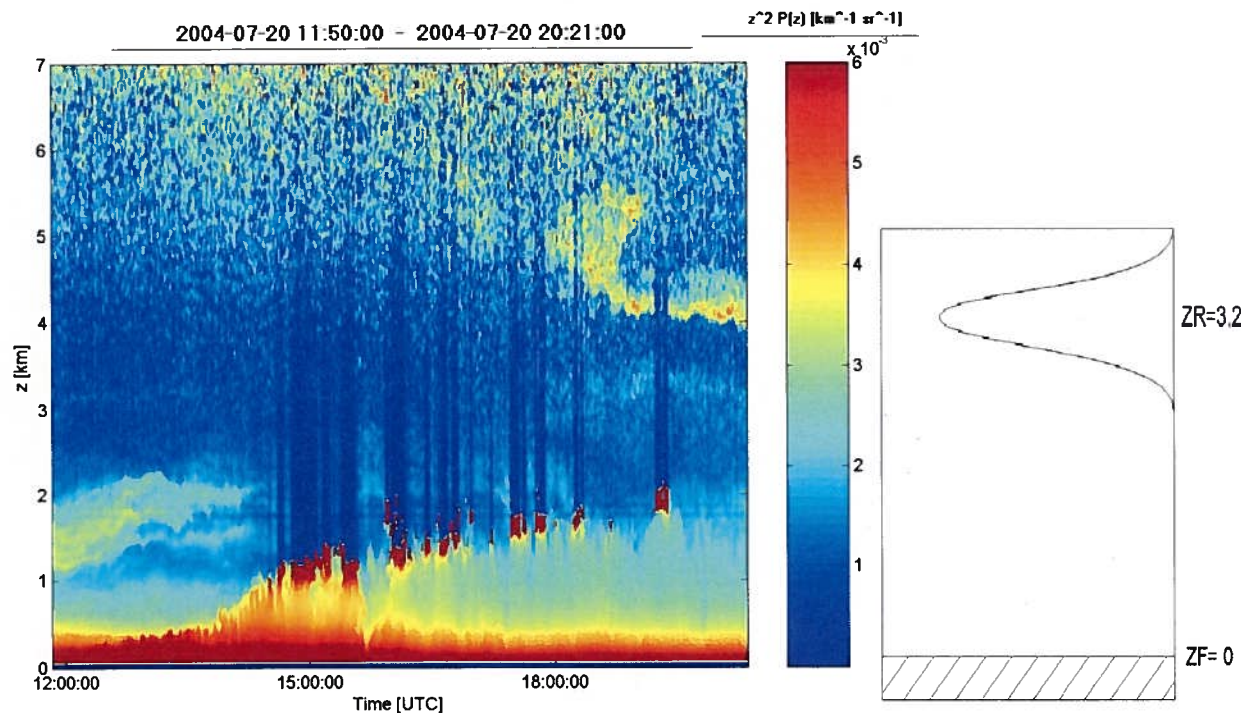


Figure 4.5 - Profil LIDAR du panache (coefficient d'extinction en $\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$) relevé à Baltimore le 20 juillet 2004 (source: U.S. Air Quality Web Blog, UMBC). À droite, schématisation du panache gaussien correspondant à la perturbation imagée.

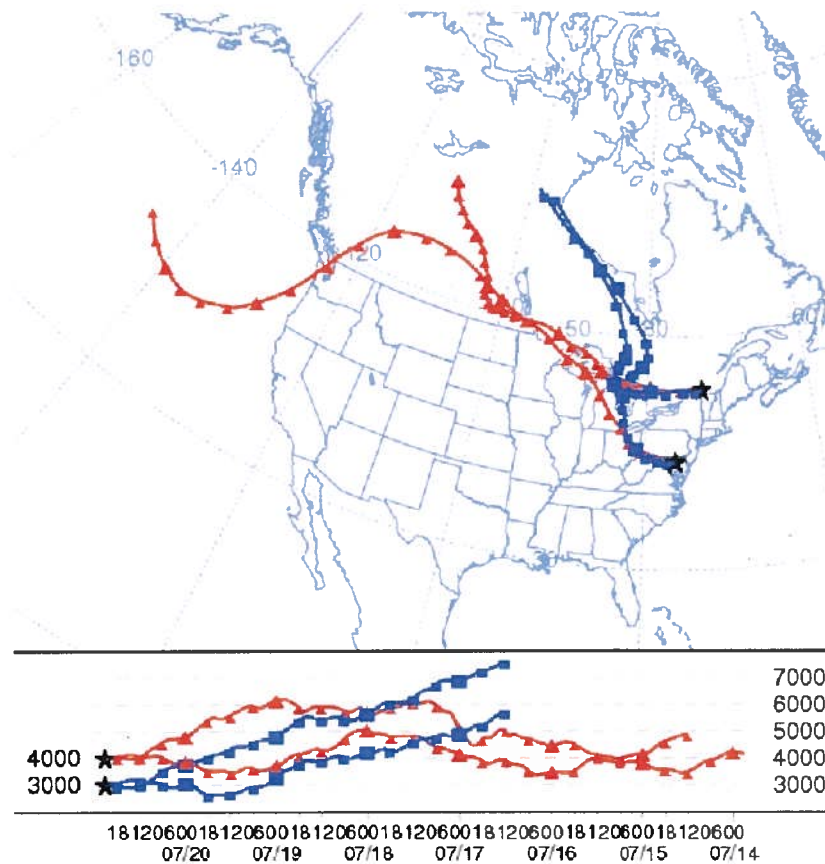


Figure 4.6 - Simulations HYSPLIT pour le 20 juillet 2004 à 20h00 et pour 6 jours en arrière pour Baltimore et saint-Jean-sur-Richelieu pour deux particules situées à 3 et 4 km d'altitude. (Source web HYSPLIT)

On va effectuer nos premiers calculs avec une cible proche de la zone de mesure des AOD effectuée avec le Microtops et la cible V11 comme on peut le noter sur la figure 3.3. Lors d'une première modélisation de panache nous avons respecté la modélisation suivante : deux gaussiennes qui ont les caractéristiques suivantes (tableau 4.2):

Tableau 4.2 - caractéristique du panache

	Centre km	écart-type km	Pourcentage de contribution à l'AOD total du panache
Gaussienne 1	3,95	1,1	75%
Gaussienne 2	2,45	0,5	25%

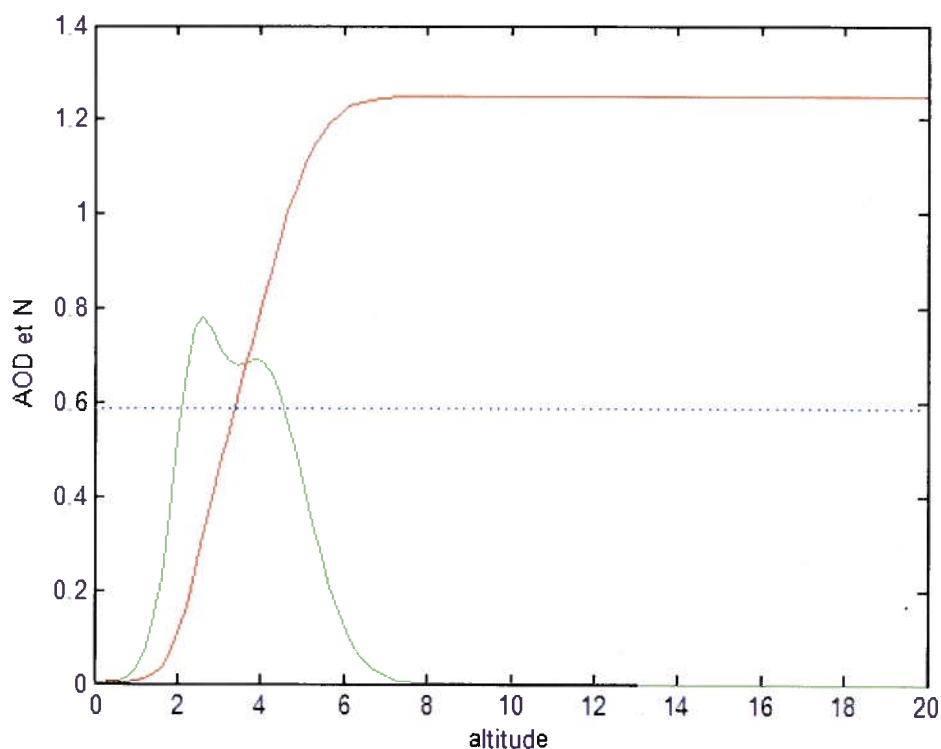


Figure 4.7 - profil du panache constitué de deux gaussiennes en terme d'AOD et du coefficient d'extinction N correspondant

Cette paramétrisation bi-modale donne un profil d'AOD et de coefficient d'extinction pour le panache illustré à la figure 4.7. et correspond à ce qui est le plus proche du profil évalué grâce à nos données MISR et HYSPLIT.

4.3. Considération sur la détermination de l'AOD du panache :

L'AOD pour l'altitude 1,59km sera fixé à la valeur de 0,59 à 550nm comme relevé avec le Microtops.

Pour L'AOD de l'altitude de 3,17km on peut se permettre de considérer une valeur plus faible ou plus forte que celle mesurée au Microtops pour deux raisons : la première étant que cette altitude se situe entre les deux cas évidents où il y a un début de panache (1,59km) et la présence certaine de celui-ci (AOD fort à 0,67km). Et la deuxième provient du fait que l'allure du profil d'AOD en fonction des longueurs d'ondes correspond peu à un polynôme de degré 2, on peut alors aussi considérer une valeur plus faible par rapport à la valeur mesurée.

En dernier lieu L'AOD pour l'altitude 0,67km pourra être majorée à la hauteur de la valeur obtenue pour ces mêmes raisons et avec l'argument supplémentaire que le profil d'AOD mesuré va en augmentant et correspond au centre de l'image, donc l'Ouest de l'image peut être affectée par une valeur plus forte au même instant puisque le panache provient de cette direction.

On peut relever le fait aussi que les variations de l'AOD sont très locales car les valeurs relevées au Microtops ont bien une réalité physique mais ne se retrouvent pas physiquement au-dessus de cette partie de l'image qui correspond à une cible donnée dans l'image CASI comme le montre la différence de prise de mesure dans la figure 3.5.

Le CASI a un mode d'acquisition de type ratissage (pushbroom) et acquiert ce qui est directement sous le capteur, alors que le Microtops suit l'angle solaire ($56,4^\circ$ pour 0,67km par exemple) ainsi, si le panache est à presque 4 km d'altitude cela fait une distance au sol de $D = 6.02$ km de la position de la partie du panache dans la ligne de visée du Microtops ($D = 4 \cdot \tan 56,4^\circ$).

C'est une estimation sommaire mais cependant cela peut avoir une réalité certaine au niveau de l'influence du panache sur les luminances acquises par le CASI. D'ailleurs, on peut estimer la variation de l'AOD entre la position de la partie du panache dans la ligne de visée du Microtops et l'AOD au dessous de la position du Microtops : si le panache est soumis à une advection à une vitesse d'environ 30 km/h cela représenterait 12 minutes de transport entre les deux points (pour notre exemple ci-dessus où la distance est de 6,02 km). Dans l'intervalle de ces 12 minutes, selon la figure 3.6, l'AOD à 550 nm va varier d'un intervalle inférieur ou proche de 0.2 pour le vol de 0.667 km.

Ces considérations sont à relever et permettront d'affiner l'interprétation de nos résultats par la suite.

4.3.1. Utilisation du modèle d'aérosols Biomass Burning de CAM5S

Le modèle de biomasse brûlée est implémenté dans CAM5S (6S) à l'aide de quatre tables de valeurs pour les quatre quantités physiques suivantes:

Coefficient d'asymétrie, coefficient de diffusion, coefficient d'extinction (dans la sous-routine AEROSO.F), et fonction de phase pour les 10 longueurs d'ondes et 83 angles de diffusion standard de CAM5S (6S). Ces paramètres fondamentaux de transfert radiatif sont décrits, par exemple, dans Hansen et Travis, 1974. En bref, la fonction de phase indique le schémas de diffusion par particule moyen d'une distribution de taille de particules. Le coefficient d'asymétrie est calculé à partir de la fonction de phase et indique le degré d'anisotropie de la diffusion (la fonction de phase des aérosols est

typiquement très anisotropes vers l'avant tandis que la fonction de phase des molécules est plus uniforme). L'angle de diffusion est l'angle entre la direction incidente d'un faisceau de lumière et la direction qu'une fraction de cette lumière diffusée prendra (fraction définie par la fonction de phase). Parce que le soleil est la plus importante source de lumière incidente, on référence souvent l'angle de diffusion à la direction d'incidence du soleil. Les coefficients de diffusion et extinction indiquent, respectivement la fraction du rayonnement incident sur un volume de particules qui est rétrodiffusé dans toutes les directions et la fraction du rayonnement incident qui est enlevé (par diffusion et absorption). Un autre paramètre important est l'albédo de simple diffusion (le rapport du coefficient de diffusion sur le coefficient d'extinction).

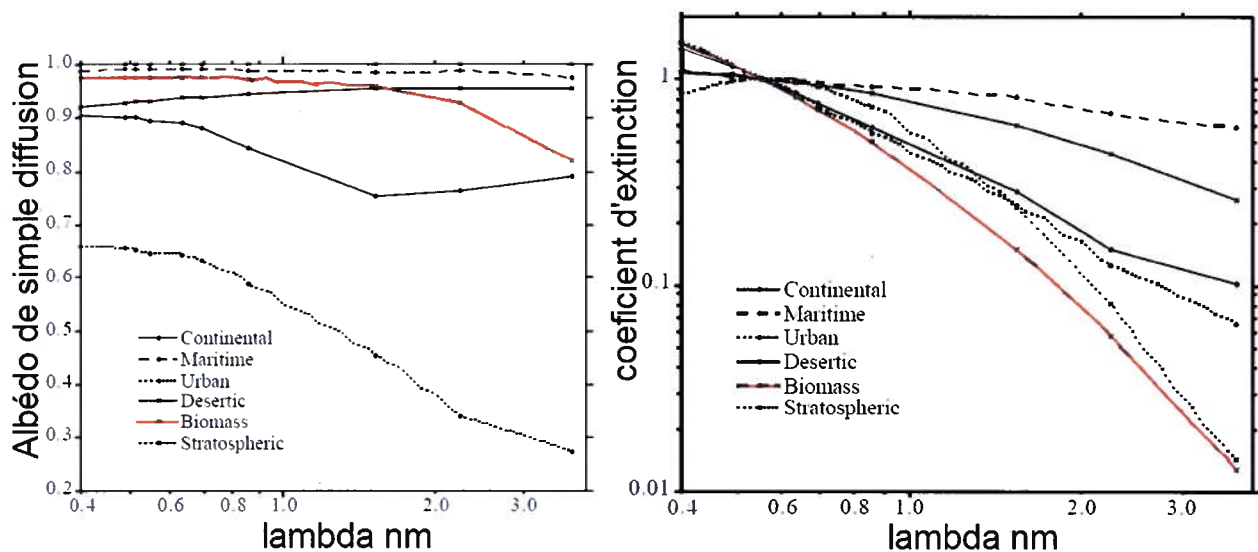


Figure 4.8 - Caractéristiques des modèles d'aérosols implémentés dans 6S (source: manuel 6S). L'albédo de simple diffusion n'a pas d'unité tandis que les unités du coefficient d'extinction sont en km^{-1} . Ce dernier paramètre est fonction de la densité numérique des particules : on a utilisé des densités numériques standard de CAM5S illustrées au tableau 4.3 pour produire le graphique à droite

Les modèles continentaux maritimes et urbains sont construits dans CAM5S à l'aide de fractions de 4 modèles de particules d'aérosols à savoir : les poussières, les particules océaniques, les matières solubles et la suie. (Vermote et al., 1997). Le tableau suivant reprend les valeurs standard implémentées pour les fractions et densités standard de ces 3 modèles et type de particules.

Tableau 4.3: composition des modèles d'aérosols d'après Vermote et al., 1997. N_j , la densité de particules, est paramétré de telle manière qu'elle égale le coefficient d'extinction à 550 nm

FRACTION	Poussières	Particules océaniques	Matières solubles	Suies
continental	0,7	0,29	0	0,01
maritime	0	0,05	0,95	0
urbain	0,17	0,61	0	0,22
CONCENTRATIONS				
Concentration de volume V_j (μ^3/cm^3)	113,98000	$113,98352 \cdot 10^{-6}$	5,14441	$59,777553 \cdot 10^{-6}$
Densité de particules N_j (part/ cm^3)	54,73400	$1,86850 \cdot 10^{+6}$	276,0500010	$1,805820 \cdot 10^{+6}$

Le modèle de combustion de la biomasse est un modèle d'aérosols tels qu'ils ressortent des mesures prises par photomètres solaires: un exemple, qui n'était pas utilisé pour développer les tableaux de CAM5S, mais qui est un exemple important de référence d'après l'étude de Eck et al., 1998 où les auteurs ont réalisés des mesures de photométrie solaire en Amazonie durant des épisodes de feux de forêt.

La figure 4.8 illustre des spectres de l'albédo de simple diffusion et du coefficient d'extinction pour les différents modèles de 6S. On a surligné (en rouge) la courbe correspondant au modèle que nous avons utilisé.

La question était de savoir quel modèle utiliser pour notre cas et si nous ne commettons pas une erreur en utilisant un modèle de biomasse brûlée.

La figure 4.9 montre les fonctions de phase des aérosols à 440nm de 2 modèles qui ont retenu notre attention comparés à la fonction de phase à 440nm qui parviennent des inversions de données obtenues avec le CIMEL de Sherbrooke. Les fonctions de phase du CIMEL sont le résultat de l'application d'un algorithme d'inversion sur les AODs ainsi que les luminances du ciel (almucantar) mesurées par ce capteur (Dubovik et King, 2000). La fonction de phase du CIMEL de Sherbrooke est fondamentalement préférable aux fonctions de phase cataloguées de CAM5S parce que celles de Sherbrooke représentent des mesures réalisées au travers du même panache de fumée qui est passé au

dessus de St-Jean-sur-Richelieu. La fonction de phase est un paramètre intensif : ceci veut dire que c'est une indice optique intrinsèque qui ne varie pas beaucoup avec la position du panache. Pour des raisons logistiques il n'était pas possible d'implémenter de nouvelles fonctions de phase et des modèles d'aérosols dans CAM5S (c'est toutefois quelque chose que l'on vise pour une étude future). À court terme nous avons plutôt opté pour une stratégie de démontrer que le choix de fonction de phase n'a pas un effet significatif sur nos résultats finaux dans ce cas spécifique.

Le choix de la longueur d'onde (440 nm) dans la figure 4.9 correspond à la région du spectre où les effets atmosphériques sont les plus sévères et donc où on devra vérifier la sensibilité de nos résultats au choix de fonction de phase. On voit que la différence entre les fonctions de phase du modèle continental et de Biomasse brûlée sont de l'ordre des différences entre la fonction de phase du modèle Biomasse Brûlée et la fonction de phase du CIMEL ($\sim 0.1 \text{ sr}^{-1}$ dans la région de l'angle de diffusion qui correspond à nos mesures : pour une gamme d'angles zénithaux solaire de 46° à 56° et un champs de visé de notre imageur qui n'est pas loin du nadir on obtient un gamme d'angles de diffusion qui varie d'environ 124° à 134°).

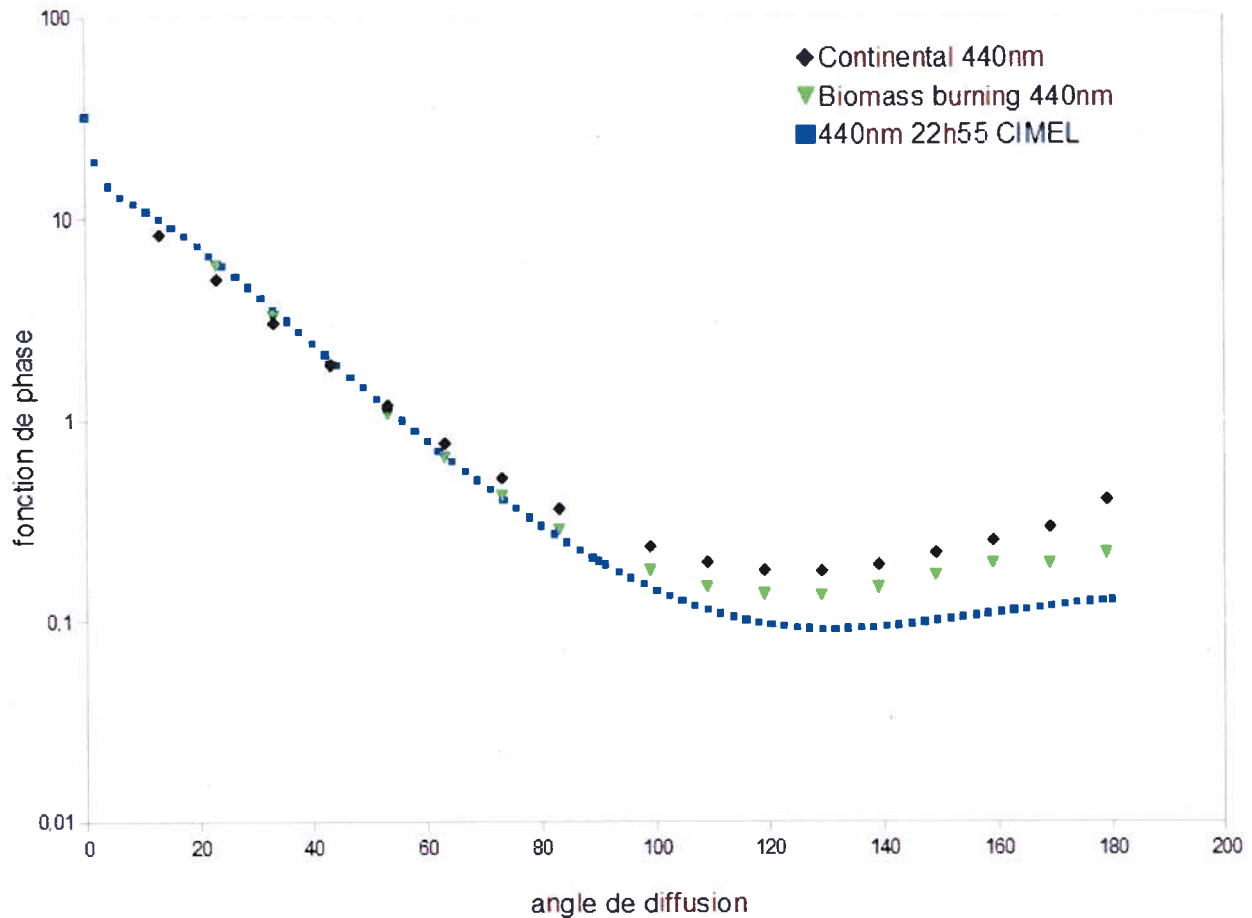


Figure 4.9 - Fonction de phase des aérosols pour 2 modèles d'aérosols (Continental, Biomasse brûlée) simulé avec CAM5S pour la bande 440nm comparée au calcul de fonction de phase issue des données CIMEL de Sherbrooke pour cette même bande.

5. Résultats

En utilisant CAM5S nous allons tester la robustesse de la modélisation, extraire les réflectances apparentes tout en vérifiant la variation de nos intrants principaux. En modélisant plusieurs profils de panache possibles nous allons extraire les $R^*(0)$ et les comparer entre elles. Nous nous attendons à ce qu'il n'y ait pas de grandes évolutions de ces réflectances résultantes puisque l'altitude du capteur est basse (réflectance apparente à 0,67km) et le panache majoritairement présent dans les couches supérieures au capteur. On validera alors notre hypothèse de départ à savoir que notre modélisation qui consiste en une approche très simpliste de la situation atmosphérique aura toutefois une réponse

acceptable par rapport à la perturbation réelle du transfert radiatif tandard. Nous ne pourrons techniquement pas évaluer tous les paramètres de cette perturbation, et par conséquent nous aurons réussis avec une méthode simple et robuste à approcher une correction acceptable et nécessaire à ce type de donnée en situation de transfert radiatif non standard.

5.1. Première étude sur une cible test, la cible V11

Nous allons donc appliquer notre méthodologie sur une première cible. La cible choisie sera la cible V11, une cible végétale qui se situe dans la zone médiane de nos images. Nous choisissons cette cible pour la simple raison qu'elle est centrale à notre zone d'étude et il se trouve aussi qu'elle est la plus proche géographiquement du site de mesure du Microtops comme discuté à la section 4.3., elle représente alors la cible avec laquelle on a le plus confiance dans la confrontation avec les données mesurées avec le photomètre, puisque si il y a une évolution horaire de l'AOD, et que le panache recouvre la zone au fur et à mesure des acquisitions CASI, on a cependant l'assurance que les AOD mesurés sont significatifs pour le voisinage proche du Microtops. Ce test va nous permettre alors d'appuyer l'argument qu'une famille de panaches est solution. Nous allons montrer aussi qu'une prise en compte de la variation de l'AOD est tout à fait possible. Par la suite nous allons comparer les différences en réflectance apparente constatées entre les deux modèles de transfert radiatif, c'est-à-dire celui tenant compte de la perturbation du panache et le modèle standard.

5.2. Estimation et test de la réflectance apparente de validation avec la cible test V11

Pour réaliser cette étape nous utilisons, comme indiqué à la section 2.1. la luminance apparente CASI à la plus basse altitude (0,667 km). Nous allons effectuer des tests avec différentes formes de panaches gaussiens relativement réalistes en fonction de nos données. Ces test vont être effectués sur la plus basse altitude afin d'extraire la réflectance apparente au sol ($R^*(0)$). On part de la modélisation initiale de notre panache (Panache 1)

Tableau 5.1 - caractéristique des 6 panaches gaussiens. L'étiquette "%age relatif" fait allusion à la fraction de l'AOD total (du panache total) représentée par chaque sous-panache du profil bi-modal

	Panache 1	Panache 2	Panache 3	Panache 4	Panache 5	Panache 6
--	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Centre 1	3,95	4.95	2.95	3	5	6
Centre 2	2,45	3.45	1.45	2	3	4
écart-type 1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
écart-type 2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
%age relatif 1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
%age relatif 2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Ce qui nous donne par exemple pour la cible V11 avec les AODs obtenus avec le Microtops de 1,25 la figure 5.1 suivante:

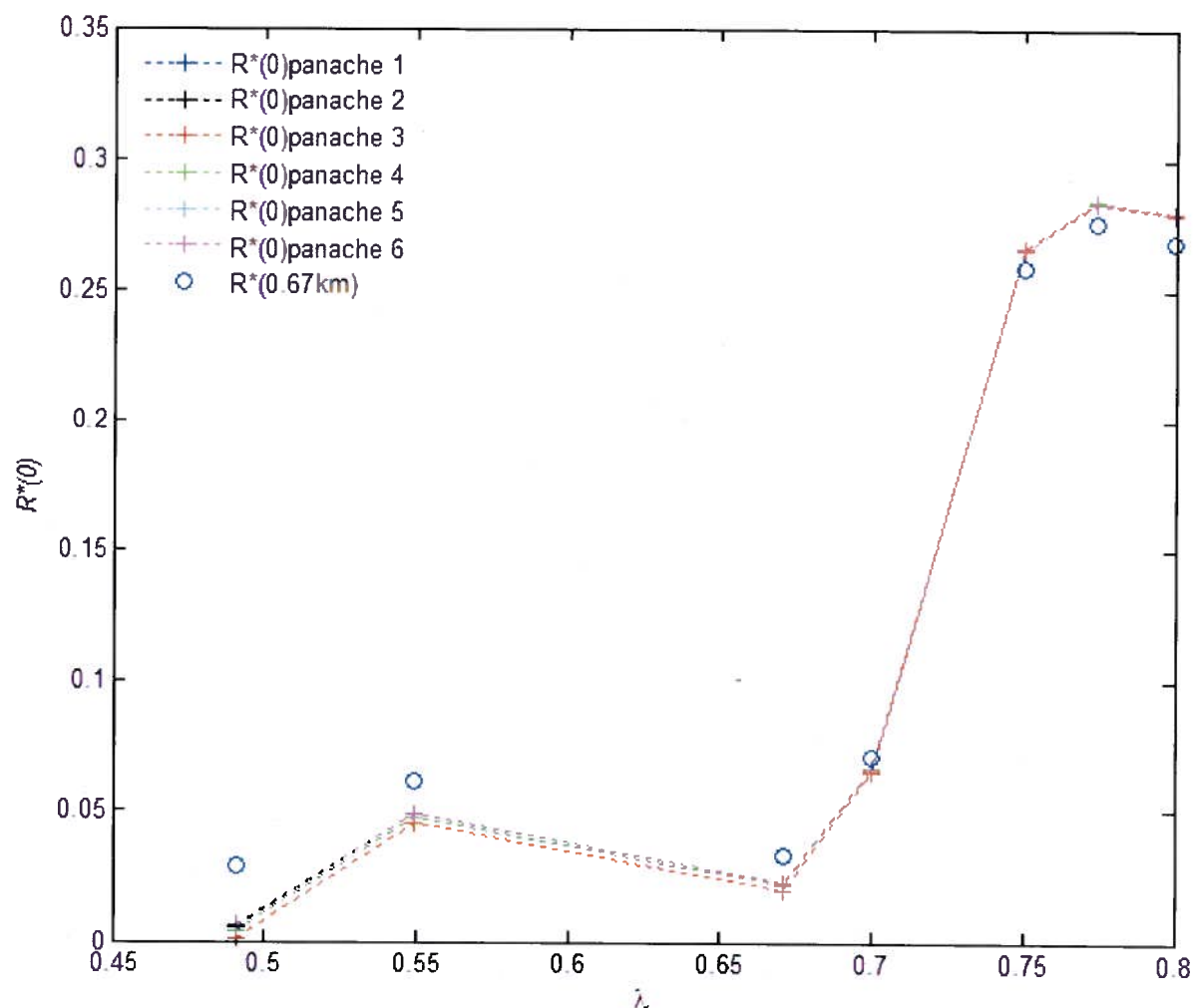


Figure 5.1 - $R^*(0)$ résultant de la correction atmosphérique appliquée aux luminances apparentes de l'altitude de 0.667 km au dessus de la cible V11 pour les 6 panaches du tableau 5.1 et pour un AOD de 1,25 à 550nm

L'altitude de 0,667 km est suffisamment basse pour que la réflectance obtenue reste assez indépendante des conditions atmosphériques sus-jacentes. En effet, nous nous fions aux données obtenues avec MISR et les simulations HYSPLIT qui nous situent un panache supérieur à 2 km d'altitude. Le comportement de l'atmosphère alors respecte dans ce cas le type standard pour une altitude plus faible en ce qui concerne la section comprise entre le sol et le capteur. La faible valeur de $R^*(0)$ dans la première bande est un peu problématique (dans le sens que la réflectance de végétation devrait être un peu plus importante que 0.008) ; nous discuterons de ce problème dans la section 5.4.

On constate que la réflectance apparente au sol calculée à partir de la plus basse altitude est assez insensible à de fortes variations de la modélisation du panache, pour des centres de gaussienne variant au maximum de 2 à 6 km la variation maximale enregistrée dans les $R^*(0)$ résultante est de 0,4% (colonne Max-Min) comme nous le montrons dans le tableau suivant:

Tableau 5.2-Tabulations des $R^*(0)$ de la figure 5.1

réflectance apparentes au sol							
lambda(nm)	Panache 1	Panache 2	Panache 3	Panache 4	Panache 5	Panache 6	Max-Min
490,7	0,0075	0,008	0,004	0,006	0,008	0,008	0,004
549,7	0,0481	0,048	0,045	0,047	0,048	0,048	0,003
671,3	0,0244	0,024	0,022	0,024	0,025	0,025	0,002
699,8	0,0669	0,067	0,065	0,066	0,067	0,067	0,002
750,2	0,2558	0,256	0,255	0,255	0,256	0,256	0,001
774,0	0,2733	0,273	0,272	0,273	0,273	0,273	0,001
799,9	0,2692	0,269	0,268	0,269	0,269	0,269	0,001

Dans le cas de l'altitude 0.667 km et pour de petites variations d'AOD par rapport à la valeur mesurée au Microtops au dessus de la cible (c'est à dire des variations de l'AOD mesuré de 1,25 à 550nm selon le tableau 5.1) nous remarquons que $R^*(0)$ est peu affectée (surtout dans les premières bandes), l'effet est légèrement plus marqué pour les 3 dernières bandes CASI comme montré à la figure 5.2.

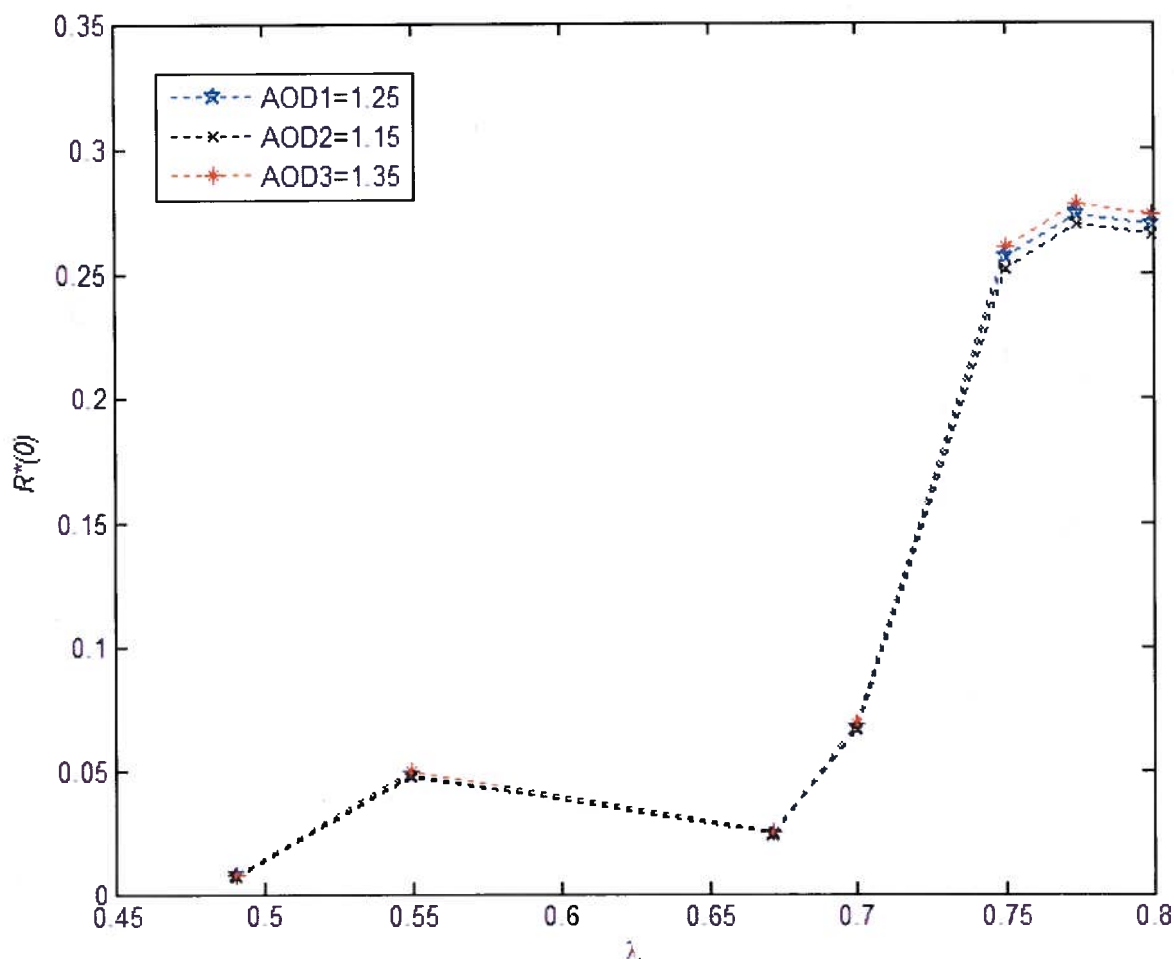


Figure 5.2 - Même analyse de variation de $R^*(0)$ que la figure 5.1 mais pour une variation de l' AOD mesuré à 550 nm dans le cas non-standard (avec panache de fumée).

Nous allons utiliser cette valeur de $R^*(0)$ qui sera la réflectance apparente au sol de validation obtenue avec la première modélisation de panache (Panache 1) pour la considérer comme étant la réflectance de référence et qui nous permettra de valider notre modélisation, on la nommera $R^*(0)_{\text{validation}}$.

Nous allons transformer les luminances apparentes CASI en $R^*(z)$, puis utiliser la version de CAM5S non standard avec la modélisation du panache 1, car il est le plus semblable aux observations obtenues avec nos données auxiliaires, et les comparer avec cette valeur de réflectance de validation.

Les résultats sont montrés à la figure 5.3 suivante. À ce stade des simulations un ajustement de la modélisation du panache va permettre de mieux assurer la correspondance des deux réflectances apparentes simulées au sol $R^*(0)$ et $R^*(0)_{\text{validation}}$. L'effet va être très faible sur $R^*(0)_{\text{validation}}$.

comme nous l'avons montré à la figure 5.2, mais aura une certaine influence sur la réflectance apparente au sol résultant des autres altitudes, surtout avec l'altitude de 3,17 km. Ainsi pour obtenir ce résultat nous avons légèrement modifié l'allure du panache 1 tels que les centres, écart-types et pourcentages des gaussiennes correspondantes soient cette fois-ci:

Tableau 5.3: caractéristiques du Panache sélectionné pour le fit de la cible V11

	centre (km)	écart-type (km)	Pourcentage de l'AOD total du panache
Gaussienne 1	3,95	1,1	0,75
Gaussienne 2	3,25	0,5	0,25

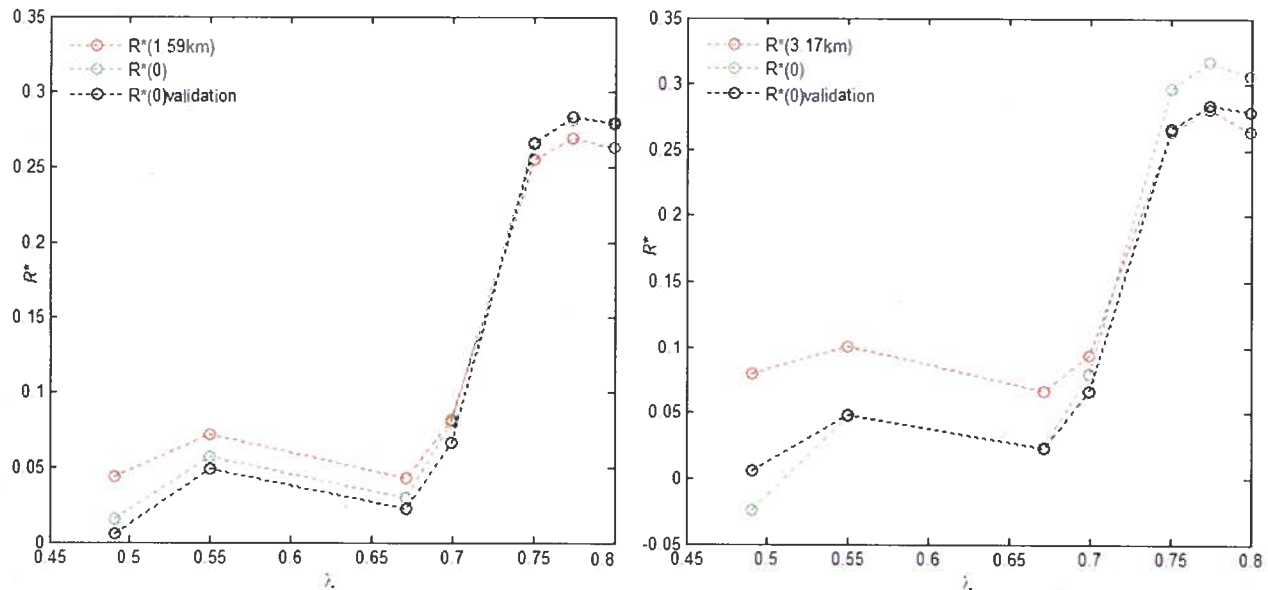


Figure 5.3 - ajustement des réflectances apparentes pour l'altitude de 1,59km et à gauche pour 3,17km avec le modèle CAM5S tenant compte de la modélisation du panache.

Dans la figure 5.3 on représente le résultat de cette correction pour les deux altitudes de 1,59km et 3,17km. Conséquemment au bon déroulement de cette étape, c'est-à-dire avec une correspondance acceptable entre $R^*(0)$ et $R^*(0)_{\text{validation}}$, c'est à dire avec un écart minimum entre les deux réflectances comme retrouvé dans Moran et al., 1992, on va pouvoir valider et confirmer que la modélisation de notre panache est correctement paramétrée dans notre modèle. Le déroulement technique de cette étape est détaillé dans l'annexe 6.

5.3. Estimation de l'erreur $dR^*(0)$ pour la cible V11

Une dernière étape alors dans ce processus consiste à vérifier que cette modélisation constitue un réel apport au niveau de la correction atmosphérique en comparant les résultats issus des modèles de transfert radiatifs, c'est-à-dire en comparant la correction obtenue avec CAM5S standard et CAM5S comportant la modélisation du panache. Pour ce faire on va effectuer une correction atmosphérique de la réflectance apparente de la cible à la plus haute altitude, en utilisant la même épaisseur optique pour les deux modèles. Dans ce cas précis, la valeur sera celle mesurée au Microtops (c'est à dire un AOD=1,09 à 550 nm pour l'altitude de 3,17km). Cette étape est montrée à la figure 5.4 suivante qui montre clairement que pour cette cible la prise en compte de la modélisation du panache apporte une correction indispensable. Le tableau suivant montre les résultats et différences entre les réflectances au sol ainsi simulées:

Tableau 5.4: Différences entre réflectances au sol

	Bande 1	Bande 2	Bande 3	Bande 4	Bande 5	Bande 6	Bande 7
λ (nm)	490,74	549,680	671,300	699,760	750,19	774,050	799,860
$R^*(0)_{\text{CAM5S standard}}$	-0,347	-0,123	-0,087	0,010	0,341	0,367	0,350
$R^*(0)_{\text{CAM5S non-standard}}$	-0,024	0,047	0,024	0,080	0,297	0,317	0,307
$dR^*(0) = R^*(0)_{\text{CAM5S standard}} - R^*(0)_{\text{validation}}$	-0,353	-0,172	-0,110	-0,056	0,075	0,083	0,071
$R^*(0)_{\text{validation}}$	0,0075	0,0481	0,0244	0,0669	0,2558	0,2733	0,2692
Erreur relative cas standard	47,27%	3,56%	4,57%	0,85%	0,33%	0,34%	0,30%
$dR^*(0) = R^*(0)_{\text{CAM5S non standard}} - R^*(0)_{\text{validation}}$	-0,030	-0,001	0,001	0,013	0,031	0,033	0,028
Erreur relative cas non-standard	4,20%	0,02%	0,02%	0,20%	0,16%	0,16%	0,14%

Bien que les $R^*(z)$ entre les deux modélisations soient assez similaires pour les trois dernières bandes spectrales, on remarque qu'elles sont nettement différentes pour les premières bandes. Nous

remarquons que, pour le cas standard, les valeurs de réflectance sont négatives pour les trois premières bandes, ce qui constitue déjà une incohérence physique ; et que l'écart entre les deux spectres de $R^*(0)$ est absolument non négligeable.

On peut estimer une erreur quadratique moyenne de 0,1635 en réflectance pour l'ensemble du spectre ce qui est très conséquent pour une cible dont la valeur spectrale moyenne est de 0,135 de réflectance.

Par contre les différences constatées entre $R^*(0)_{\text{CAM5S non-standard}}$ et $R^*(0)_{\text{validation}}$ sont plus basses, atteignant un maximum de -0,030 pour la première bande, lorsque la réflectance apparente au sol obtenue avec le modèle standard comporte une erreur 10 fois plus élevée. L'annexe 8 présente ce résultat pour les 18 cibles choisies.

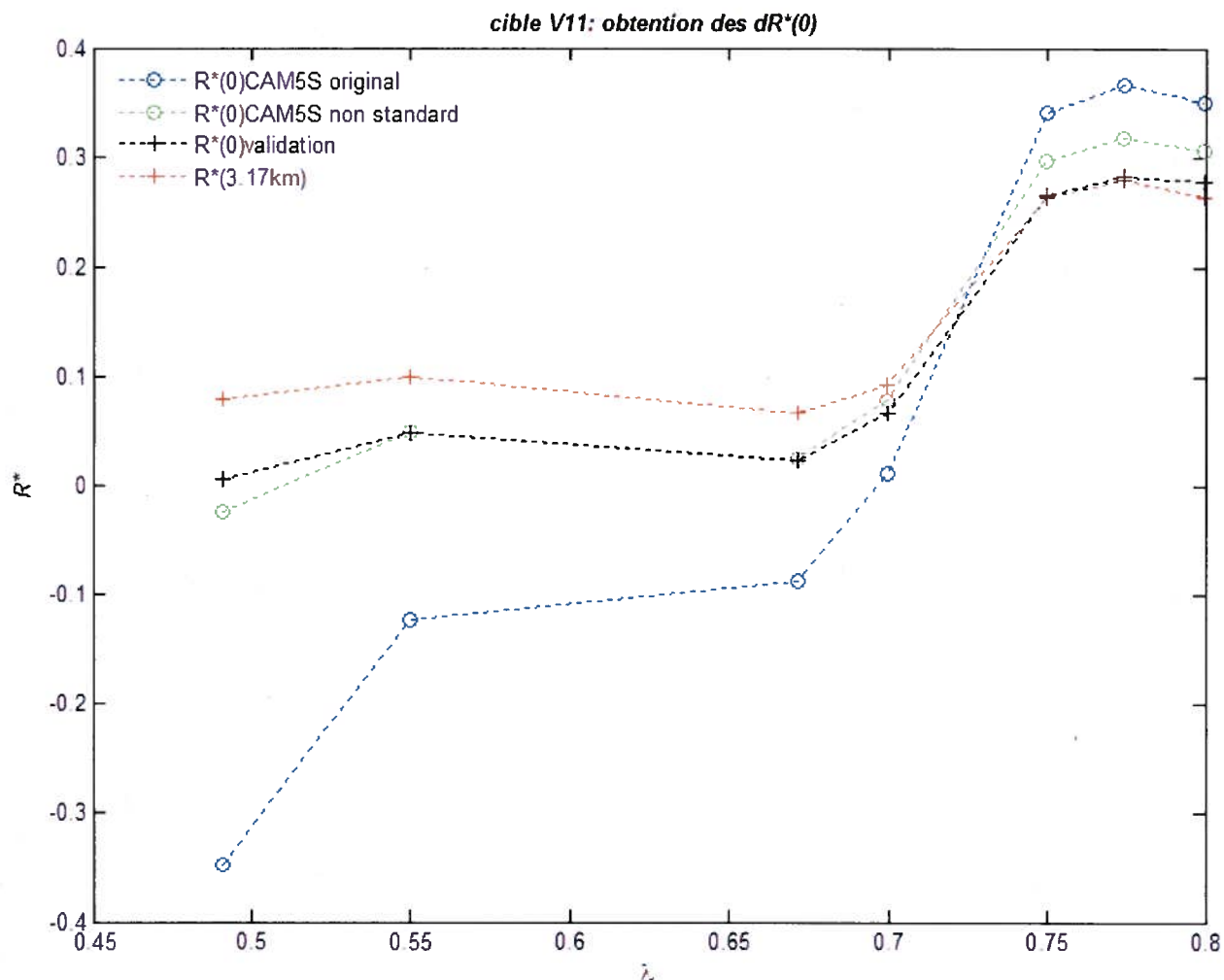


Figure 5.4 - Comparaison entre correction atmosphérique standard et celle non-standard tenant compte de la modélisation du panache.

L'erreur moyenne quadratique en valeur absolue dans le cas standard est aussi significativement plus large que la valeur moyenne de 0,0237 dans le cas non standard.

La conclusion de cette étude de la cible V11 est favorable à notre méthodologie de la prise en compte de la perturbation atmosphérique considérée. Nous avons pu paramétrer correctement cette perturbation à l'aide de données auxiliaires, ajuster la modélisation et mettre en évidence l'apport indispensable d'une telle modélisation afin de correctement estimer les $R^*(0)$. Il reste à généraliser ces résultats aux 17 autres cibles. En notant toutefois que la cible V11 n'avait pas été choisie par hasard ; en effet, cette cible est au milieu de notre zone d'étude et est proche de la mesure de l'AOD prise avec le Microtops. Par conséquent on s'attend à ce que les $R^*(0)$ s'accordent au mieux avec les $R^*(0)_{\text{validation}}$ de cette cible, une généralisation pour les autres cibles de notre images peut donner des résultats différents.

5.4. Généralisation des résultats.

Nous avons alors exprimé la moyenne de l'erreur en valeur absolue selon l'équation quadratique suivante :

$$dR^*(0)_{\text{moyen}} = \sqrt{\sum_{\lambda} \frac{(R^*(0)_{\text{CAMSS}} - R^*(0)_{\text{validation}})^2}{N}} \quad (5.4.1)$$

Les résultats pour les cas standard et non-standard sont montrés pour la même forme de panache comme paramétré au tableau 5.2. Les épaisseurs optiques choisies vont être celles du Microtops (c'est-à-dire 0,59 pour 1,59km; 1,09 pour 3,17 km et 1,25 pour 0,67 km). Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5.5 suivante.

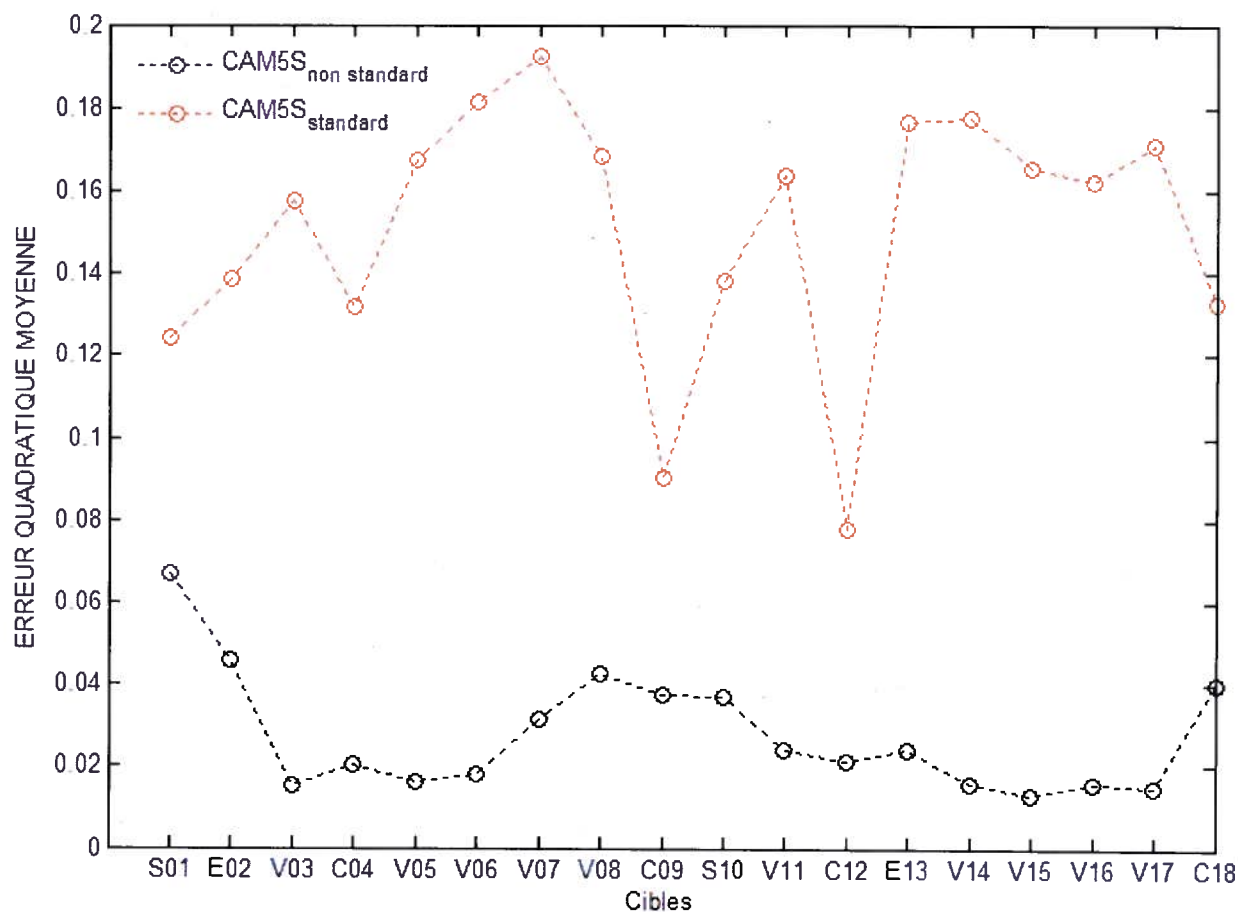


Figure 5.5 - résultats des erreurs moyennes pour les modèles standard et non-standard pour les 18 cibles, un panache constant (panache 1) et des AODs aux altitudes constantes (valeurs du Microtops). Les erreurs sont calculées sur toutes les 7 bandes du CASI

Comme nous l'avions supposé, la valeur de l'erreur moyenne pour la cible V11 dans le cas non-standard est parmi les plus basses, on remarque cependant qu'un minimum est atteint par la cible V15. On remarque aussi que pour une majorité de cibles (10 exactement) l'erreur moyenne se situe au dessous de 0,035 (en valeur de différences de réflectance) dans le cas non-standard. Ce qui reste une erreur élevée toutefois.

Une considération majeure cependant est que l'erreur associée au modèle standard est toujours nettement supérieure au cas non-standard et cela même dans le cas où l'erreur est la plus forte dans le cas non-standard (cible S01). La première cible a une erreur assez significative dans le cas non-standard cependant on pourrait l'associer à un effet de l'environnement. Nous avons aussi déjà discuté de l'aspect de la variation de l'épaisseur optique, et il est fort probable que l'épaisseur optique pour une

même altitude varie sur notre zone d'étude et être beaucoup plus forte que celle estimée, de plus le profil de panache pourrait être modifié. Il serait donc préférable de faire une étude approfondie (comme nous l'avons fait pour la cible V11) de cette cible problématique S01 afin d'ajuster le profil du panache, mais surtout des épaisseurs optiques aux altitudes et considérer l'effet aussi de son environnement qui est radicalement différent spectralement.

Commençons par visualiser spectralement ce qui se passe dans le cas non-standard avec l'erreur obtenue. On présente les résultats de l'erreur moyenne dans le cas non-standard $dR^*(0) = R^*(0)_{CAMSS \text{ non standard}} - R^*(0)_{\text{validation}}$ à la figure suivante pour chaque bande du CASI et chaque cibles :

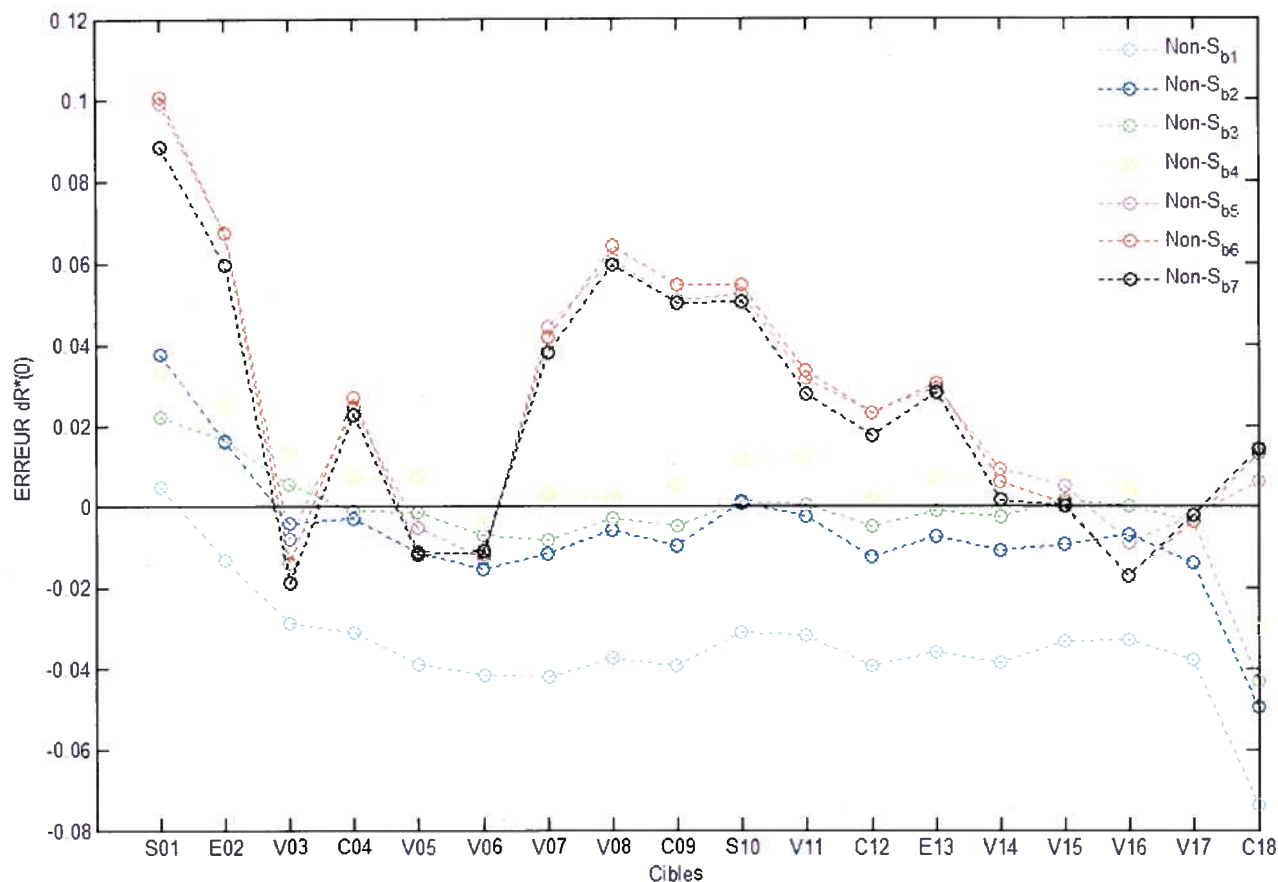


Figure 5.6 - Erreur moyenne pour les 7 bandes CASI et les 18 cibles sélectionnées (cas non-standard).

En ce qui concerne les cibles E01 et S02 on remarque une forte erreur pour les bandes du proche infra-rouge (bande 6 et 7), ce qui pourrait être interprété comme un effet d'environnement (végétation) qui a un comportement spectral différent de celui de la cible, mais il faut rester prudent avec ce constat car une forte erreur est aussi notée pour la cible V08 au comportement similaire à celui de son environnement. La piste d'une mauvaise estimation de l'AOD pour ces cibles est toujours exploitable.

La figure suivante (figure 5.7) montre le même résultat obtenu dans le cas standard avec CAM5S. On peut remarquer alors que l'erreur relative moyenne est majoritairement supérieure, et surtout que les écart constatés en valeur de différence de réflectance varient de -0,4 à 0,2 environ contre -0,08 à 0,1 dans le cas non-standard.

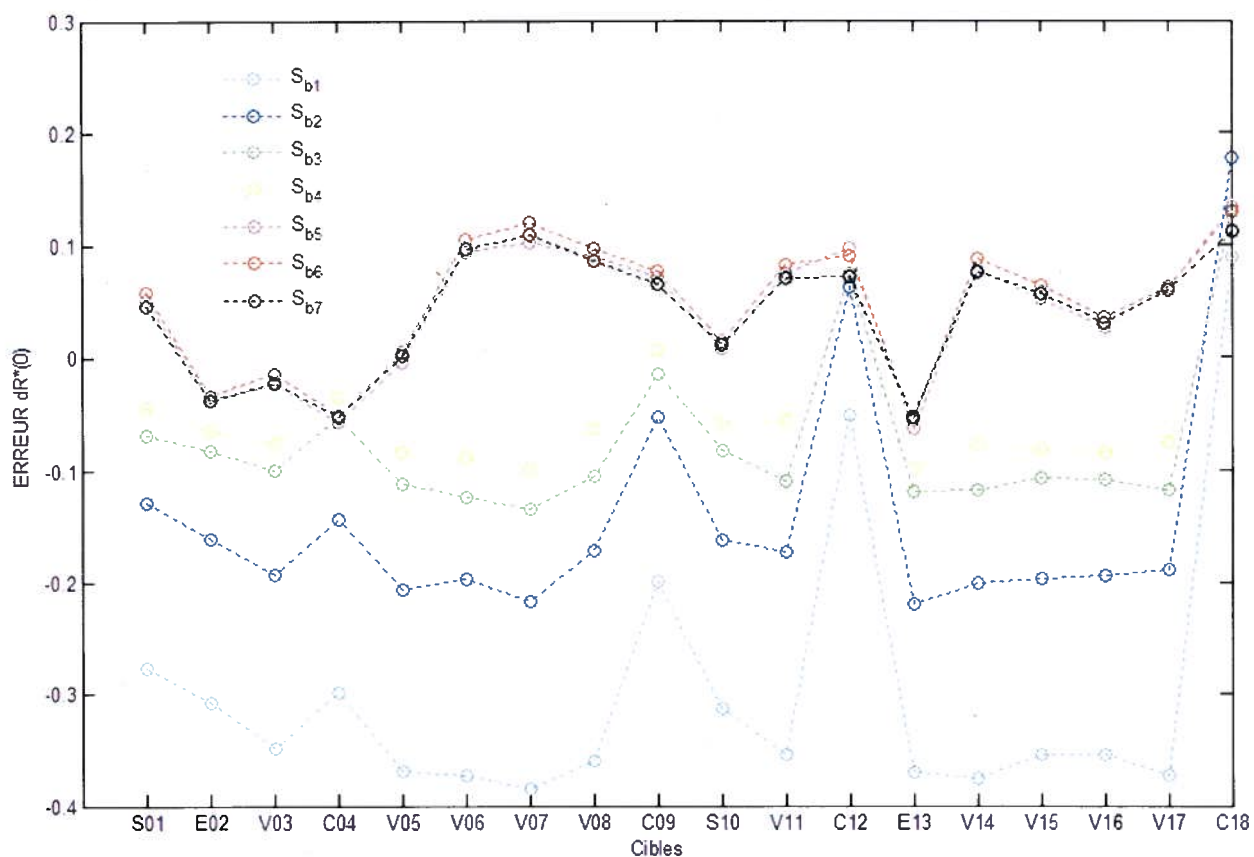


Figure 5.7 - Erreur moyenne pour les 7 bandes CASI et les 18 cibles sélectionnées (cas standard).

Considérant les bandes 2, 3 et 4 nous avons une erreur comparativement faible. Le proche infra-rouge aurait tendance par contre à majorer considérablement cette erreur. Cette erreur est pratiquement identique pour les trois bandes 5, 6 et 7; atteignant un maximum de 0,1 en réflectance pour la cible S01. Ce qui représente un erreur absolu de $R^*(0)$ qui est assez importante.

Les résultats de $R^*(0)_{\text{validation}}$ au sol pour la première bande sont souvent faibles (comme nous l'avons constaté à la figure 5.1 pour la cible V11) et les amplitudes des $dR^*(0)$ sont assez importantes pour pratiquement toute les cibles. Pour les bandes 2, 3 et 4 de manière générale les cibles végétales 'V..' présentent une erreur moindre que les cibles claires, sombre ou d'eau (qui sont aussi des cibles sombres en terme de valeur de réflectance).

Cependant si l'on considère l'erreur quadratique moyenne résultante pour les trois bandes présentant une erreur faible, c'est à dire les bandes 2, 3 et 4 (490,74nm, 549,68nm et 671,3 nm) nous obtenons la figure suivante:

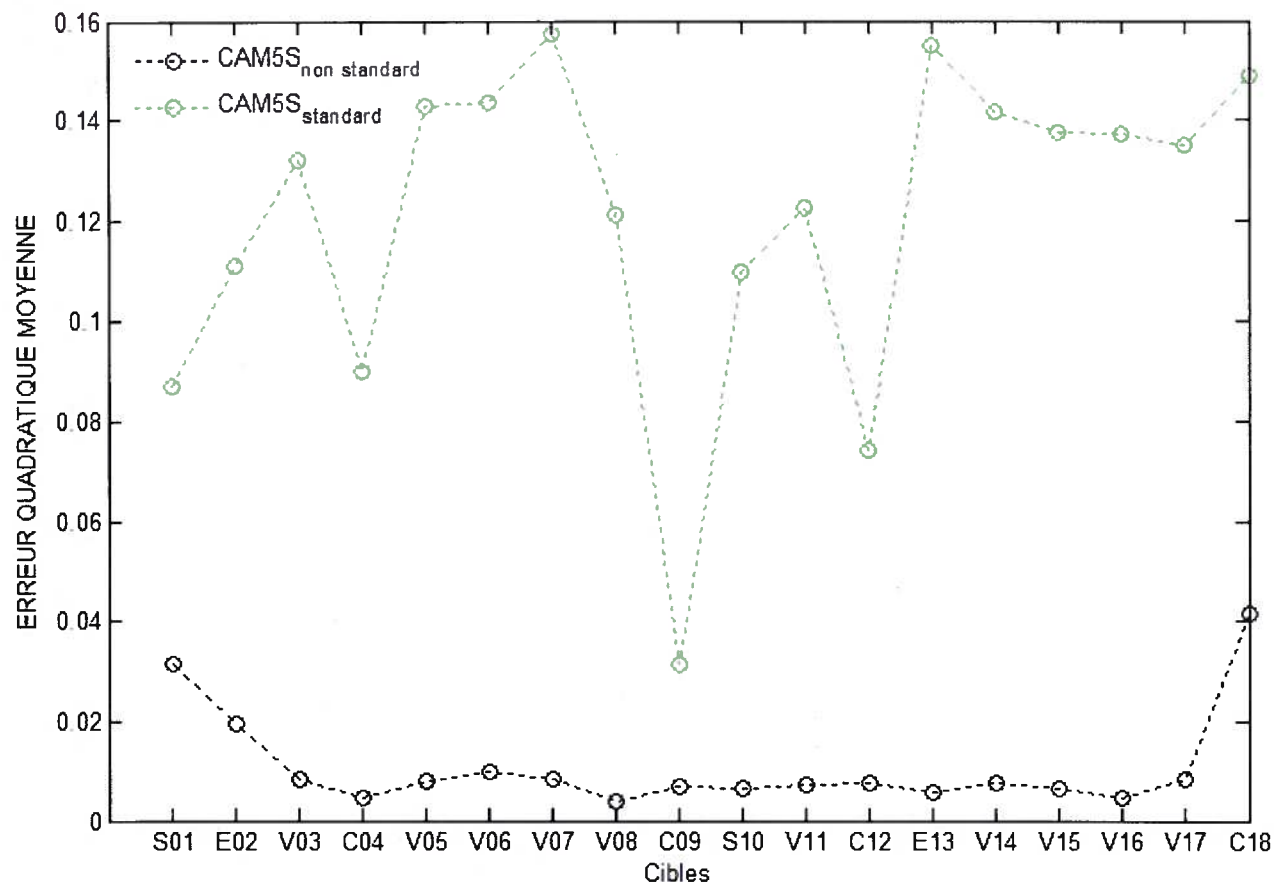


Figure 5.8 - erreur quadratique moyenne des 18 cibles limitée aux bandes 2,3 et 4 du CASI dans le cas standard et non-standard.

On remarque que l'erreur est assez stable pour un grand nombre de cibles et reste en dessous de 0,01, sauf pour les cibles S01, E02 et C18. En ce qui concerne l'erreur quadratique moyenne pour le cas standard, on remarque évidemment qu'elle atteint systématiquement des valeurs nettement supérieures.

Il est intéressant de noter que les cas problématiques correspondent aux cibles dont la réflectance de l'environnement diffère spectralement de celui de la cible. En effet les données de Saint-jean-sur-Richelieu sont largement dominée par un environnement végétal avec le parcellaire agricole, les boisés et zones vertes de la ville, ce qui fait que ces cibles de nature différente de leur environnement (cf : Annexe 7) vont avoir un comportement spectral nettement affecté par celui-ci, surtout dans le cas d'atmosphère à fort AOD. La région du proche-infrarouge, les cibles à environnement non similaire et la première bande du CASI sont les trois points problématiques de ces résultats. Il faut alors considérer chacune de ces trois situations problématiques à savoir donc :

5.4.1. Erreur majeure pour les trois dernières bandes du proche-infrarouge:

Si nous considérons le domaine du proche infrarouge on peut considérer, par exemple, les travaux antérieurs de Vermote et al., 2002 avec des données satellites et la figure suivante montre le résultat d'une correction atmosphérique dans ce contexte particulier :

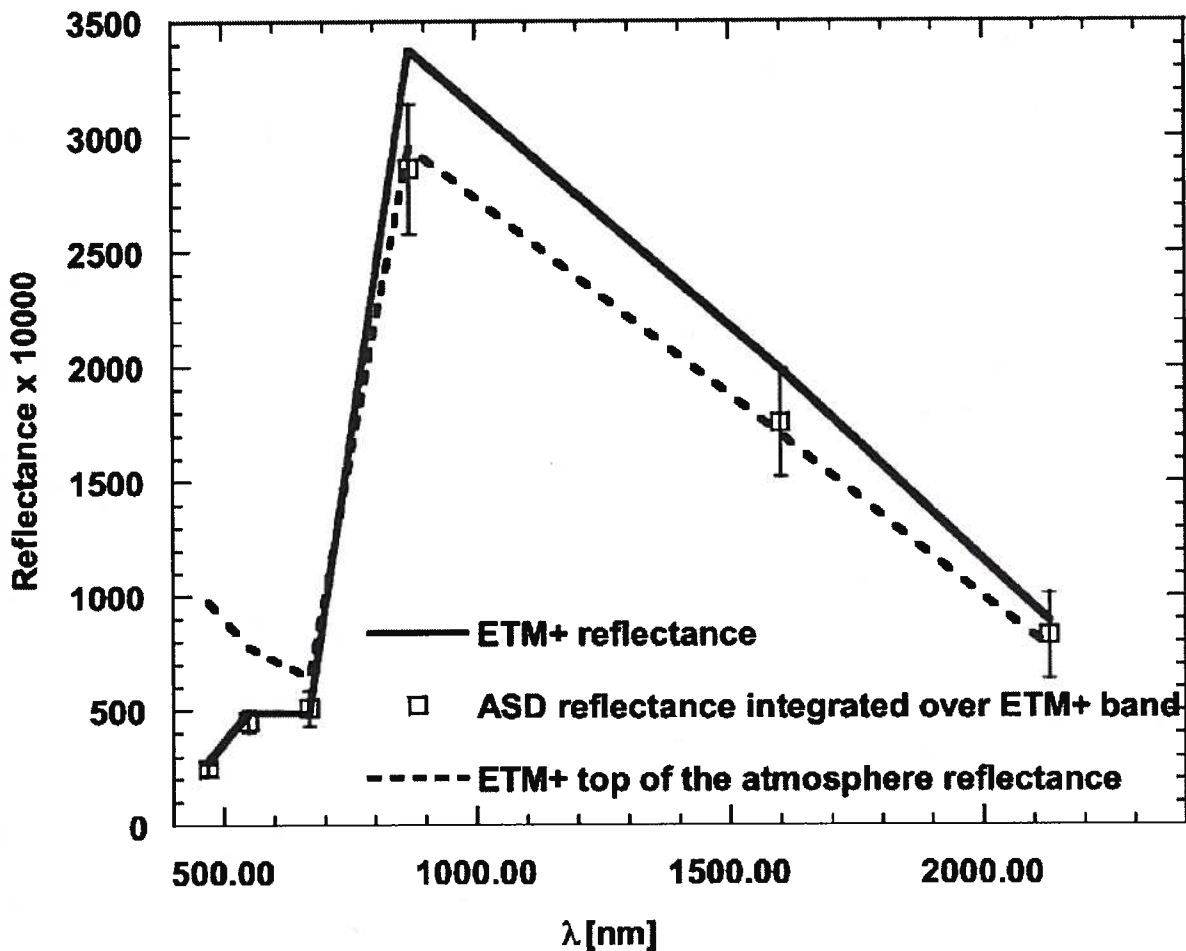


Figure 5.9 - Comparaison de la réflectance de la surface ETM + avec des mesures au sol (ASD) pour une parcelle d'herbe jaune (d'après Vermote et al., 2002)

Dans cette étude effectuée sur une cible d'«herbe jaune», c'est-à-dire de plante sénescence sur laquelle a été appliquée une correction atmosphérique afin de retrouver les paramètres de surface obtenus avec un ASD (ASD pour : Analytical Spectral Device, un spectromètre de terrain); mais cette étude est réalisée avec des images satellites du Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM) qui ne correspondent pas à la situation radiative de notre cas (données aéroportées). Néanmoins en commentant la figure 5.9

on s'aperçoit que les résultats obtenus lors de cette correction atmosphérique satellitaire qui donne des résultats semblables aux nôtres dans une certaine mesure. En effet ils montrent une correction qui est très bonne dans le VIS mais surestimée dans le PIR. Les auteurs soulèvent dans leur conclusions la nécessité d'approfondir de telles études (à noter que leur cas d'étude présentait une AOD de seulement 0.12 à 550 nm).

5.4.2. Erreur importante pour la première bande dans le bleu :

Dans la figure 5.10 suivante nous montrons les erreurs $dR^*(0) = R^*(0)_{CAM5S} - R^*(0)_{validation}$ pour la bande 1 dans le cas standard et le cas non-standard.

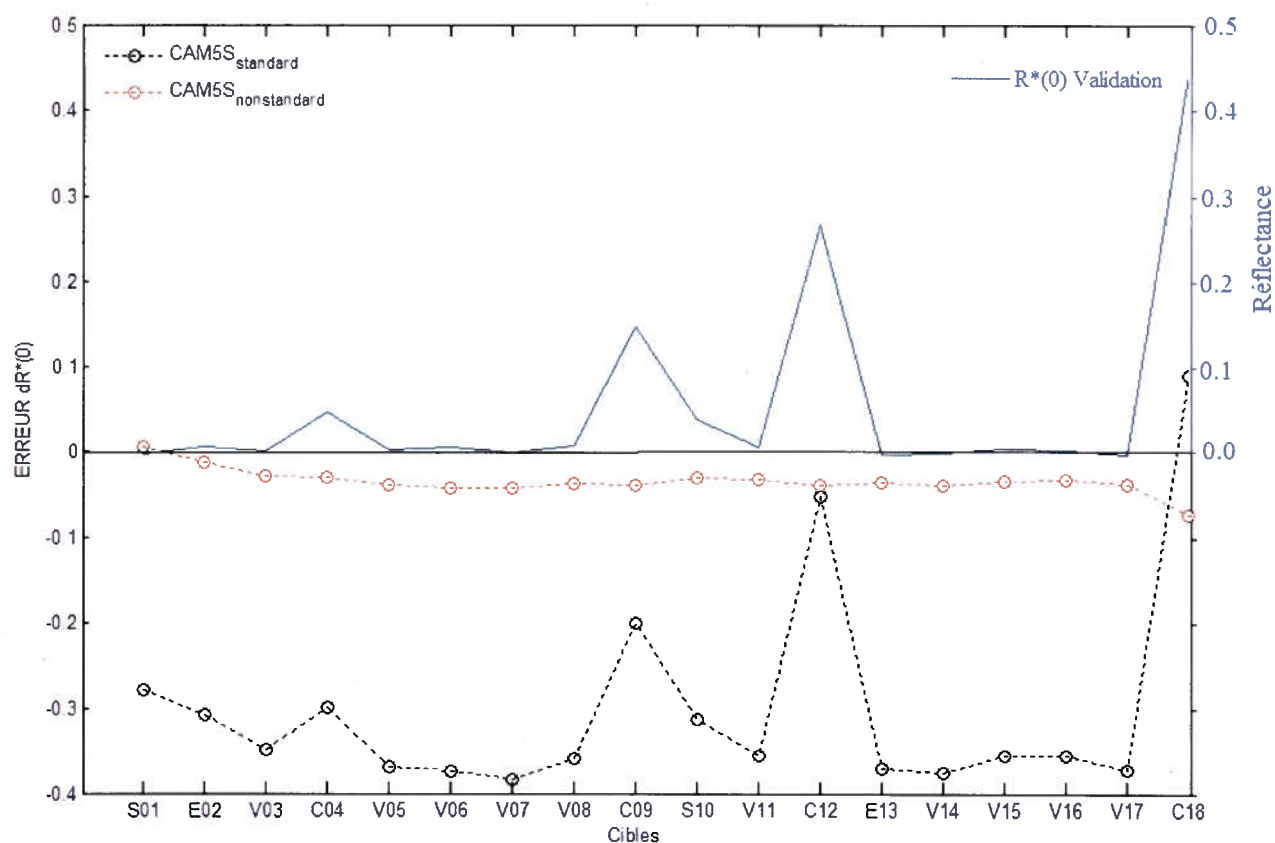


Figure 5.10 - Erreur $dR^*(0)$ pour la bande 1 dans le cas standard et non-standard pour les 18 cibles, on fait apparaître en bleu la valeur de $R^*(0)_{validation}$ sur un autre axe.

On peut noter que les valeurs de l'erreur pour le cas non-standard sont significativement plus petites en valeur absolue que pour le cas standard. Pour cette raison cette observation constitue déjà un résultat satisfaisant. Mais il reste par contre le fait que cette erreur est toutefois assez majeure dans un sens relatif : on note que l'amplitude $|dR^*(0)|$ est de l'ordre de l'amplitude de l'estimât de $R^*(0)$ validation à la figure 5.4 (que nous avons fait apparaître avec une ligne bleue) et en général, est relativement très large par rapport aux faibles valeurs de $R^*(0)$ attendue à cette longueur d'onde. Lorsque l'on regarde la figure 5.6 on remarque que cette erreur a un comportement vraiment similaire à l'erreur des autres bandes 2, 3 et 4 mais qu'elle se trouve à un seuil différent (amplitude plus importante) et cela quel que soit la cible considérée, y compris les cibles problématique de notre étude.

Une explication possible serait qu'il y avait un problème de calibration pour cette bande. Dans ce cas nous pourrions peut-être envisager une calibration *a posteriori* de cette bande afin d'amener les valeurs de $R^*(0)$ et l'estimât de $R^*(0)$ à des valeurs plus réalistes.

5.4.3. Comportement de l'erreur pour les cibles claires, et sombres pour les bandes dans le visible :

Pour ces cibles à forte erreur quadratique, S01, E02, et C18 de la figure 5.7, on aurait tendance à incriminer le contexte de réflectance environnant de la cible en question. Nous avons déjà abordé cette question de l'effet de l'environnement (cf annexe 7). Du point de vue des résultats nous avons toujours fait tourner le modèle en routine avec une cible de faible rayon et un environnement qui est considéré par le modèle comme optiquement infini. On rappelle que l'environnement a été déterminé en faisant la moyenne de 400 par 400 pixels autour de chaque cible (chapitre 3.). On peut toutefois noter que ces trois cibles en question sont caractérisées par des réflectances pouvant être surestimées (ou sous-estimée dans le cas de la cible C18) par cette modélisation. Pareillement pour la cible C18 le toit en question fait une largeur maximale de 8 mètres. Or nous avons fait tourner notre modèle CAM5S avec une cible moyenne de rayon 15m ce qui constitue l'échantillonnage majeur de nos cibles mais est sans doute problématique pour ces deux cas. En ce qui concerne la dernière cible S01 elle a été difficilement choisie aux frontières des images de 0,67km et 1,59km (cf figure 3.3) car le recouvrement n'était pas

optimal pour cette zone. On remarque aussi que de manière générale les meilleurs résultats sont obtenus avec les cibles comportant un environnement spectralement similaire aux cibles choisies. Pour ces considérations nous pourrions dans un premier temps ignorer ces trois cibles problématiques.

5.4.4. Considération sur la fonction de phase utilisée:

La figure 4.9 nous a montré que les différences de fonction de phase entre le modèle continental et le modèle BB étaient ~ des différences entre la fonction de phase du modèle BB et la fonction de phase du CIMEL à 440 nm. Donc si on peut démontrer que nos graphiques d'erreur $dR^*(0)$ sont sensiblement indépendants des différences de fonction de phase entre les modèles continental et BB, la même chose pourra être dit pour l'impact des différences entre les fonctions de phase du modèle BB la fonction de phase CIMEL.

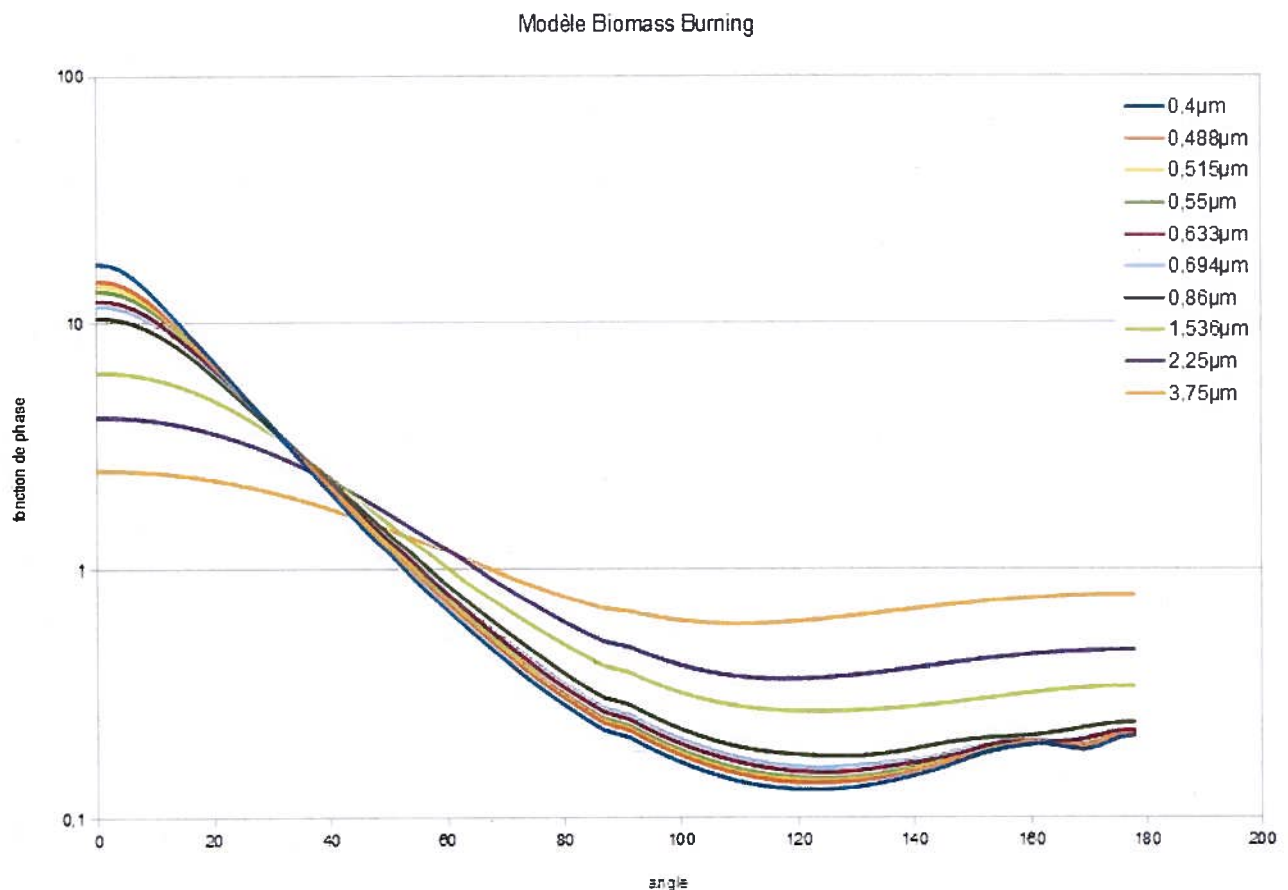


Figure 5.11 - fonction de phase pour le modèle Biomass Burning implémenté dans CAM5S

La figure suivante montre les différences observées entre ces deux différents modèles de phase (Biomasse burning et Continental) pour les erreurs observées avec les modèles standard et non-standard ainsi qu'avec la réflectance apparente de validation ($DR\ R^*(0)_{validation} = R^*(0)_{continental} - R^*(0)_{biomasse\ burning}$) pour la bande 1 à 490,74 nm.

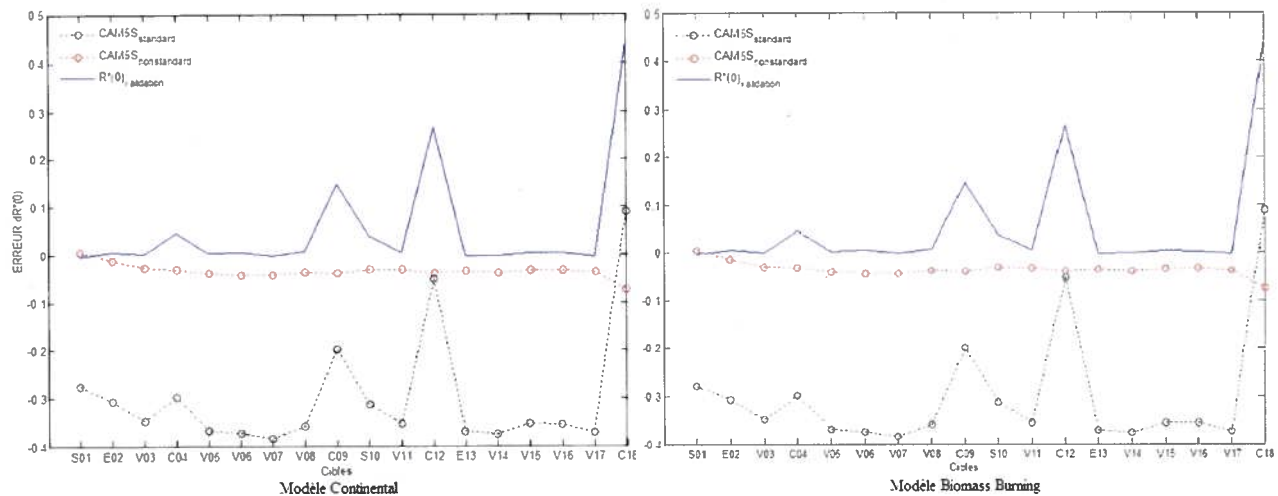


Figure 5.12 - différences observées entre les deux différentes fonctions de phase (continental et Biomasse Burning) pour les erreurs entre modèles standard et non-standard ainsi qu'avec la réflectance apparente de validation obtenue.

On remarque que les différences entre les résultats obtenus avec les deux différents modèles restent très minimales en terme d'écart de réflectance ($dR^*(0)_{continental} - dR^*(0)_{biomasse\ burning}$), ne dépassant pas 0,002 ou -0,01. Ce qui nous apporte donc une variation négligeable dans les résultats finaux, surtout en comparaison avec les autres sources majeures d'erreurs de notre problématique.

Un autre remarque aussi concerne la réflectance apparente de validation qui en fait est très stable d'un modèle à l'autre, les différences observées ne dépassent pas les 0,001 en valeur absolue.

On peut conclure alors que l'étude spécifique des données du CIMEL de Shebrooke n'est pas un point fondamental dans la bonne interprétation des données, cependant, dans des études postérieures, il serait souhaitable d'utiliser de telles données qui permettent ainsi d'avoir accès à un intrant mesurable supplémentaire.

6. Discussions

L'application d'une correction atmosphérique non-standard à des données réelles afin de valider l'erreur d'un modèle dans ces cas relativement problématique d'atmosphères avec présence de panache de fumée, va fournir des résultats qui constituent une aide aussi pour appuyer la modélisation de ceux-ci. Si le transfert radiatif donne des résultats cohérents en fonction de la modélisation faite grâce à d'autres données, cela apporte un certain crédit à la modélisation qui a pu être effectuée par l'intermédiaire de ces données. Nous parlons ici des données auxiliaires MISR, LIDAR, et HYSPLIT.

En quelque sorte la bonne appréhension morphologique du panache va permettre une compréhension du transfert radiatif correspondant et les résultats d'une correction atmosphérique confirmeront la bonne modélisation de la perturbation.

Cette étude est une première approche de modélisation non-standard sur un tel cas, cela nécessite un approfondissement avec d'autres cas comparables dans la complexité. Cette problématique pourrait alors être étendue aux minces panaches des couches de pollution à d'autres morphologie de panache de fumée, et d'autres types de particules, en somme, toute perturbation qui ne serait pas prise en compte dans les modèles standard.

On ne néglige pas dans cette étude que l'obtention de la réflectance apparente de validation est obtenue par une correction atmosphérique. L'impact de cette approche est certes mineur du fait de la faible altitude considérée, et en termes des vérifications que nous avons réalisées pour démontrer la faible dépendance sur l'état de l'atmosphère, mais constitue toutefois un biais à considérer dans notre étude, puisque fondamentalement notre référence est construite avec l'outil que nous voulons caractériser. En d'autres termes nous critiquons un modèle avec une quantité obtenue par lui-même.

Néanmoins nous faisons une caractérisation entre deux altitudes radicalement différentes et le comportements radiatif pour la plus haute altitude va être essentiellement contrôlé par le contexte atmosphérique sous-jacent tandis que la plus faible altitude est peu affectée par le contexte radiatif.

L'établissement de l'AOD aussi dans une situation aussi perturbée est sujet à discussion. Comme c'est un des intrants principaux il faut aussi qu'il donne une cohérence au modèle. On a commenté le fait qu'une même cible au sol verrait son bilan radiatif perturbé par un panache; il doit alors y avoir un impact certain sur cet autre intrant majeur qu'est l'AOD, or nous n'avons accès qu'à une mesure ponctuelle de celle-ci pour chacune de nos trois images et chacun de nos trois survols. Une étude

approfondie de la variation de l'AOD serait le meilleur moyen d'améliorer les résultats de cette étude, nous avons d'ailleurs parlé au début de cette étude du fait que nous essayons de modéliser un phénomène tridimensionnel avec très peu d'observables mesurables.

Justement, lors de l'élaboration de notre hypothèse nous avons soulevé le point que la correction atmosphérique pourrait être alors prise en compte par une simplification du contexte atmosphérique en modélisant ce cas particulier d'une manière très simpliste mais en adéquation avec les outils disponible pour la paramétrer. Ainsi, le parti pris d'une approche simplifiée, qui était en fait la seule possibilité de modéliser cette perturbation atmosphérique non-standard, a permis d'atteindre nos objectifs d'une manière satisfaisante à la vue de la complexité de ce jeu de donnée.

Après toute une phase de traitement des données, nous avons pu déterminer 18 cibles différentes avec des environnements différents. Avec l'aide de données auxiliaires nous avons modélisé la perturbation non-standard et l'avons implémenté dans un modèle de transfert radiatif. Ainsi pour certaines cibles et certaines bandes spectrales, avec une bonne évaluation de notre AOD qui était l'intrant principal de cette modélisation et la bonne estimation de la réflectance au sol de validation, nous avons pu estimer une erreur en réflectance apparente au sol d'une manière quantitative et qualitative; Cette erreur étant bien entendu aussi liée au type de modélisation que nous avons pu réaliser.

7. Conclusions et recommandations

Dans cette étude nous avons réalisé une application pour des données réelles afin de valider le processus de correction atmosphérique dans un cas relativement problématique. Nous avons émis comme hypothèse qu'une modélisation simple d'une situation atmosphérique difficilement modélisable en fonction des données disponibles pourrait apporter de bons éléments de réponse et une certaine bonne approximation des paramètres au sol lors de la correction atmosphérique. Nous pouvons alors dire en fonction des résultats obtenus que nous avons validé cette hypothèse. Ce travail a permis aussi d'apporter une bonne compréhension de la complexité de la situation atmosphérique et une bonne prise en compte des paramètres mis en jeu dans le cas d'une telle problématique.

C'est une première approche de modélisation sur un tel cas, avec des données aéroportées multi-altitude, cela nécessite un approfondissement avec d'autres cas comparables dans la complexité. Il faudrait élargir ce type d'étude à d'autres types de contamination atmosphérique.

Une des lacunes de ce sujet réside dans la découverte *a posteriori* de la perturbation singulière. Dans la mesure où la perturbation (le panache) avait pu être détectée et suivie avant la prise de mesure (comme quelques jours avant), le protocole aurait été mis en place dès l'acquisition des données ce qui aurait pu permettre un meilleur suivi de la perturbation à imager, c'est à dire un meilleur contrôle des paramètres libres comme une correspondance des données multi-angulaires MISR et/ou une proximité de données LIDAR etc. Cependant ces propos peuvent être modérés par le fait que ces processus turbides, aux parcours prévisible à court terme mais pas sur le long terme, sont difficiles à tracer et demanderaient une mise en place et une importante quantité de données (le court terme étant de l'ordre d'une semaine, et le long terme de l'ordre d'un mois). Ils sont bien sûr retraçables, mais les atmosphères standard sont plus prévisible selon la période de l'année et la localisation géographique. Le point positif vient alors que dans de nombreux cas les perturbations seront découvertes en cours d'analyse de données et ce travail constitue une étude pertinente afin d'améliorer la qualité des données et de permettre des extractions de quantités biophysiques exploitables.

L'étude et le retraçage des perturbations non-standard de ce genre est une démarche tout à fait nouvelle dans le sens où nous avons utilisé les moyens classiques, mis à disposition, pour effectuer des corrections atmosphériques et tenter d'exprimer une atmosphère non-standard avec les intrants habituels. Cette approche nécessitant toutefois une modification de la variation du profil standard des aérosols dans le modèle de transfert radiatif.

Dans le cas idéal, une campagne de terrain spécifiquement orientée pour ce type d'étude (et donc sans une thématique agricole) pourrait être menée en établissant une méthodologie spécifiquement appliquée à des cas de panache de fumée. A priori, les atmosphères non standards lors des campagnes de terrain, sont facilement détectables grâce à la surveillance satellite, et les modèles de propagation et diffusion particulière permettent un suivi des perturbations climatiques. Des modifications à l'instrumentation et la préparation aux campagnes de terrain serait toutefois nécessaires pour s'adapter à ce type d'étude. Par exemple, les lidars au sol ne sont pas des données standard et c'est un domaine de mesure en plein développement avec les lidars atmosphériques. Justement, les données du satellite CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) pourraient être alors une bonne alternative de suivi LIDAR). L'utilisation d'un diffuseur sur le toit de l'avion (pour estimer l'éclairement descendant et ensuite $R^*(z)$) ou de spectre de réflectance mesuré au sol auraient été un

ajout considérable pour cette étude, même si elle voulait s'affranchir d'une multiplication des ressources que nécessite ce type de campagne de terrain. Il faut aussi considérer que cette étude est très fondamentale et aurait bonifié par ce type de donnée.

Le protocole néanmoins établi est une démarche souple qui va permettre de retracer et améliorer le processus de correction atmosphérique sans effectuer de grands investissements dans la sophistication des modèles. Ceci est très important du fait que ces modèles doivent fonctionner dans un environnement opérationnel avec un débit massif de données-images. Une solution 3D de transfert radiatif ne répond pas à ces exigences, surtout quand, comme on a montré dans cette thèse, il y a des solutions approximatives qui permettent de réaliser une précision de correction qui est vraisemblablement cohérente avec les besoins des télédéTECTEURS de surface.

L'étude sur un panache de fumée représente un progrès pertinent, mais d'autres perturbations seront à étudier, et plus précisément d'autres perturbations faisant intervenir d'autres types de particules. Il faudra alors travailler sur des événements de pollution dont les profils verticaux diffèrent significativement du profil simple de CAM5S et des événements de pollution dans la présence de forte humidité relative dont la fonction de phase diffère assez radicalement des fonctions de phase dans CAM5S. Un autre défi pour la correction atmosphérique est la présence des minces nuages de faible épaisseur optique et d'étendue horizontale assez homogène (comme des nuages cirrus par exemple). Ces nuages représentent, comme les panaches de fumée des profils non-standard et leur fonction de phase est nettement différente des fonctions de phase qui caractérisent les particules de fumée et de pollution. Cependant leur très haute altitude concernera une méthodologie uniquement satellitaire puisque peu d'avion peuvent survoler à ces hautes altitudes.

8. Références

Abramowitz, M. et Stegun, I. A., 1970. Handbook of mathematical functions (ninth Dover printing), Dover Publication, London, 1046 p.

Alakian et al., 2007: Alakian, A., Marion R. et Briottet X., Radiative modeling and characterization of aerosol plumes in hyperspectral imagery, *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2007*, pp.3219-3224

Bergeron, M. 2005. Bilan d'Erreur pour la Correction Atmosphérique d'Images Hyperspectrales dans le Visible et Proche Infrarouge, Université de Sherbrooke. Thèse, 182 p.

Chandrasekhar, S., 1960. Radiative Transfer, Dover Publication, New-York, 393 p.

Chavez, Jr. P. S. 1996 . Imaged-based atmospheric correction revisited and improved, *American society for photogrammetry and remote sensing*, vol 62, no 9, pp. 1025-1036.

Coll, C., Galve, J. M., Sanchez, J. M. et Caselles V. 2010 . Validation of Landat-7/ETM+ Thermal-Band Calibration and atmospheric Correction With Ground-Based Measurements, *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, vol 48, no 1, pp. 547-555.

Damoah, R., Spichtinger, N., C. Forster, C., James, P., Mattis, I., Wandinger, U., S. Beirle, S., Wagner, T. et Stohl, A. 2004 . Around the world in 17 days - hemispheric-scale transport of forest fire smoke from Russia in May 2003, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol 4, no 5, pp. 1311-1321.

Diner, D. J., Bruegge, C.J., Martonchik, J.V., Ackerman, T.P. et Davies, R. 1989. MISR: A Multiangle Imaging SpectroRadiometer for geophysical and climatological research from EOS, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol 27, no 2, pp. 200-214.

Draxler R. R. et Hess, G.D., 1997: Description of the HYSPLIT_4 modeling system, NOAA Technical Memorandum. ERL ARL-224. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 24 p.

Dubovik, O. and M. D. King, 2000: A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements," *Journal of Geophysical Research*, vol 105, No D16, pp. 20 673-20 696.

Eck, T. F., Holben, B. N., Slutsker, I. et Setzer, A. 1998 . Measurements of irradiance attenuation and estimation of aerosol single scattering albedo for biomass burning aerosols in Amazonia, *Journal of Geophysical Research*, vol 103, no D24, pp. 31,865-31,878.

Elterman, 1970: Elterman, L., vertical-attenuation model with eight surface meteorological ranges 2 to 13 kilometers, *Environmental research papers*, air force cambridge research labs hanscom.

Erlick, C. et Frederick, J. E. 1998 . Effects of aerosols on the wavelegth dependence of atmospheric transmission in the ultraviolet and visible ". continental and urban aerosols in clear skies, *Journal of Geophysical research*, vol 103, no D18, pp. 23,275-23,285.

Hansen, J. E. etTravis, L. D. 1974 . Light scattering in planetary atmospheres, *Space Science Reviews*, Springer Netherlands, vol 16, no 4, pp. 527-610.

Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I. et Smirnov, A. 1998 . AERONET- A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environement*, vol 66, pp. 1-16.

Islam, M. A., 1999. Application of a Gaussian plume model to determine the location of an unknown emission source, *Water, air and soil pollution*, vol 112, no 3-4, pp. 241-245.

Jensen, J. R., . Introductory Digital Image Processing, 3rd Edition, Upper Saddle River, Prentice-Hall, Inc., 526 p.

Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Gao, B., Li, R. et Flynn L. 1997 . The MODIS 2.1- μm Channel. Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol 35, no 5, pp. 1286-1298.

King, M. D. et Byrne, D. M. 1976 . A method for inferring total ozone content from spectral variation of total optical depth obtained with a solar radiometer, *Journal of the atmospheric sciences*, vol 33, pp. 2242-2251.

Lauer, D.T., Morain, S. A. et Salomonson, V. V. 1997 . The Landsat Program: Its origins Evolution and impacts, *journal of the american society for photogrammetry and remote sensing*, vol 63, no 7, pp. 831-838.

Lushi, E. et Stockie, J. M. 2010 . An inverse Gaussian plume approach for estimating atmospheric pollutant emissions from multiple point sources, *Atmospheric Environment*, vol 44, no 8, pp. 1097-1107.

Mazzoni, D., Logan, J. A., Diner, D., Kahn, R., Lingling, T. et Qinbin, L. 2007 . A data-mining approach to associating MISR smoke plume heights with MODIS fire measurements, *Remote sensing of environment*, vol 107, no 1-2, pp. 138-148.

McClatchey et al., 1972: McClatchey, R. A. ; Fenn, R. W. ; Selby, J. E. A. ; Volz, F. E. ; Garing, J. S., Optical Properties of the Atmosphere (Third Edition), *Environmental research papers*, air force cambridge research labs hanscom. 113 p.

Miller et al., 1995: Miller, J., Freemantle, J., Shepherd, P., Gray, L., O'Neill, N., Royer, A., et Senese, E., Deployment of CASI to meet the needs of BOREAS science, Proceedings of the 17th canadian symposium on remote sensing, saskatoon, saskatchewan, pp. 169-175.

Moran, Ray D. Jackson, Philip N. Slater, et Philippe M. Teillet, 1992 . Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output, *Remote Sensing of Environment*, vol 41, no 2-3, pp. 169-184.

Morys et al., 1996: Morys, M. F., Mims III, F. M. et Anderson S. E., Design, calibration and performance of MICROTOPS II hand-held ozonometer, *J. Geophys. Res.*, vol 106, no D13, pp. 14,573–14,582.

Mueller Jr, D.W. et Crosbie A.L. 2002 . Three-dimensional radiative transfer in an isotropically scattering, semi-infinite medium: generalized reflection function, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, no 72, pp. 19-36.

Nicodemus, F. E. 1977 . Directional reflectance and emissivity of an opaque surface, *Applied Optics*, vol 4, no 7, pp. 767-773.

O'Neill, N. T., Miller, J. R., et Freemantle, J. R., 1995 . Atmospheric correction of airborne brf to yieldsurface brf : Nomenclature, theory, and methods, *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol 21, no 3, pp. 309–327.

O'Neill et al., 1996: O'Neill, N. T., Royer, A. et Nguyen, M. N., Scientific and technical report on the development of a modified version of the H5S code which incorporates major features of the 6S code, CARTEL internal report, Université de Sherbrooke, 62 p.

O'Neill, N. T., Zagolski, F., Bergeron, M., Royer, A., Miller, J. R., et Freemantle, J., 1997 . Atmospheric correction validation of CASI images acquired over the Boreas southern study area., *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol 23, no 2, pp. 143–162.

Paciorek, C. J., Liu, Y., Moreno-Macias, H. et Kondragunta, S., 2008 . Spatiotemporal Associations between GOES Aerosol Optical Depth Retrievals and Ground-Level PM2.5, *Environmental Science & Technology*, vol 42, no 15, pp. 5800-5806.

Prados, A. I., Kondragunta, S., Ciren, P. et Knapp, K. R., 2007 . GOES Aerosol/Smoke Product(GASP) over North America: Comparisons to AERONET and MODIS observations, *Journal of Geophysical research*, vol 112, no D15201, pp. 15.

Schaepman-Strub, G., Schaepman, M.E., Painter, T.H., Dangel, S. et Martonchik, J.V., 2006 . Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies, *Remote Sensing of Environment*, vol 103, no 1, pp. 27-42.

Shinozuka, Y., Redemann, J., Livingston, J. M., Russell, P. B., Clarke, A. D., Howell, S. G., Freitag, S., O'Neill, N. T., Reid, E. A., Johnson, R., Ramachandran, S., Mc Naughton, C. S., Kapustin, V. N., Brekhovskikh, V., Holben, B. N. et McArthur, L. J. B., 2011 . airborne observation of aerosol optical depth during ARCTAS: vertical profiles, inter-comparison and fine-mode fraction, *atmospheric chemistry and physics*, vol 11, pp. 3673-3688.

Smirnov, A., Holben, B., Giles, D., Slutsker, J., O'Neill, N., Eck, T., Macke, A., Croot, P., Courcoux, Y., Sakerin, S., Smyth, T., Zielinski, T., Zibordi, G., Goes, J., Harvey, M., Quinn, P., Nelson, N., Radionov, V., Duarte, C., Losno, R., Sciare, J., Voss, K., Kinne, S., Nalli, N., Joseph, E., Moorthy, K., Covert, D., Gulev, S., Milinevsky, G., Larouche, P., Belanger, S., Horne, E., Chin, M., Remer, L., Kahn, R., Reid, J., Schulz, M., Heald, C., Zhang, J., Lapina, K., Kleidman, R., Griesfeller, J., Gaitley, B., Tan, Q. et Diehl, T., 2011 . Maritime aerosol network as a component of AERONET - first results and comparison with global aerosol models and satellite retrievals, *atmospheric measurement techniques*, vol 4, no 3, pp. 583-597.

Smith, G. M., et Milton, E. J., 1999 . The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance, *International Journal of Remote sensing*, vol 20, no 13, pp. 2653-2662.

Tsai, D. M., 1995 . A fast thresholding selection procedure for multimodal and unimodal histograms, *Pattern Recognition Letters*, vol 16, no 6, pp. 653-666.

Turquety, S., Logan, J. A., Jacob, D. J., Hudman, R. C., Leung, F. Y., Heald, C. L., Yantosca, R. M., Wu, S., Emmons, L., Edwards D. P. et Sachse, G. W., 2007 . Inventory of boreal fire emissions for North America in 2004: Importance of peat burning and pyroconvective injection, *Journal of Geophysical research*, vol 112, no D12S03, pp. 13.

Val Martin, M., Logan, J. A., Kahn, R. A., Leung, F.-Y., Nelson, D. L. et Diner, D. J., 2010 . Smoke injection heights from fires in North America: analysis of 5 years of satellite observations, *atmospheric chemistry and physics*, vol 10, pp. 1491-1510.

Vermote, E. F., El Saleous, N. Z., Justice, C. O., 2002 . Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results, *Remote Sensing of Environment*, vol 83, pp. 97-111.

Vermote, E. F., Tanré, D., Deuzé, J. L., Herman, M. et Morcrette, J-J., 1997 . Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview, *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, vol 35, no 3, pp. 615-686.

Weitkamp, C. (ed.), 2005. Lidar : range-resolved optical remote sensing of the atmosphere, Springer series in optical sciences, New York, 455 p.

Zagolski, F. et Gastellu-Etchegorry, J. P., 1995 . atmospheric corrections of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of the 5S Model, *International Journal of Remote sensing*, vol 16, no 16, pp. 3115-3146.

Zagolski, F., O'Neill, N. T., Alain, R., et Miller, J., 1999 . Validation of a ddv-based aerosol optical depth retrieval algorithm using multialtitude spectral imagery, *Journal of Geophysical research*, vol 104, no D22, pp. 27,959–27,971.

Zhao, W., Tamura, M., Takahashi, H., 2000 . Atmospheric and spectral corrections for estimating surface albedo from satellite data using 6S code, *remote sensing of environment*, vol 76, pp. 202-212.

Annexes

Annexe 1 - Modélisation d'un panache gaussien à l'aide de la Fonction d'erreur

Dans cette annexe on vise à modéliser le coefficient d'atténuation et l'épaisseur optique des aérosols en fonction de l'altitude en présence d'un panache de fumée. On présume que la variation verticale du coefficient d'extinction du panache peut être modélisée à partir d'une distribution gaussienne (un modèle qui est d'ailleurs cohérent avec les modèles classique de dispersion de panaches, comme cité dans Islam 1999) Dans un modèle linéaire selon z allant de $z=0$ à $z=\infty$; l'épaisseur optique totale du panache est nommée τ_{aplume} , son écart-type sera σ et le centre de la gaussienne aura pour valeur l'altitude $z=Z_m$.

La formulation doit respecter les caractéristiques suivantes :

Le panache est forcé à la valeur 0 quand $z=0$ km, ceci provient simplement du fait que l'épaisseur optique des aérosols τ_a ou AOD s'exprime en fonction du coefficient d'extinction κ_a :

$$\tau_a = \int_0^z \kappa_a dz$$

la relation entre κ_0 le taux de coefficient d'extinction du panache et $\kappa(z)$ sera dans le cas gaussien:

$$\kappa = \kappa_0 e^{-(z-Z_m)^2/(2\sigma^2)}$$

si on fait le changement de variable en passant à la variable t suivante:

$$t = (z - Z_m)/(\sqrt{2}\sigma) \text{ alors } \sqrt{2}\sigma dt = dz$$

on aura:

$$\tau_a = \kappa_0 \int_{(-Zm)/(\sqrt{2}\sigma)}^{(z-Zm)/(\sqrt{2}\sigma)} e^{-t^2} \sqrt{2}\sigma dt$$

$$\tau_a = \sqrt{2}\sigma \kappa_0 \int_{(-Zm)/(\sqrt{2}\sigma)}^0 e^{-t^2} dt + \sqrt{2}\sigma \kappa_0 \int_0^{(z-Zm)/(\sqrt{2}\sigma)} e^{-t^2} dt$$

$$\tau_a / \sqrt{2}\sigma \kappa_0 = \int_{(-Zm)/(\sqrt{2}\sigma)}^0 e^{-t^2} dt + \int_0^{(z-Zm)/(\sqrt{2}\sigma)} e^{-t^2} dt$$

$$\tau_a / \sqrt{2}\sigma \kappa_0 = \sqrt{\pi}/2 \{ \text{erf}(zm/\sqrt{2}\sigma) + \text{erf}(z-zm/\sqrt{2}\sigma) \}$$

$$\tau_a = \sqrt{\pi}/2 \sigma \kappa_0 \{ \text{erf}(zm/\sqrt{2}\sigma) + \text{erf}(z-zm/\sqrt{2}\sigma) \}$$

où la fonction d'erreur «erf» est décrite dans Abramowitz et Stegun, 1970, à $z=\infty$ on aura $\tau_a = \tau_{a \text{ plume}}$ donc:

$$\kappa_0 = \tau_{a \text{ plume}} / (\sqrt{\pi}/2 \sigma \{ 1 + \text{erf}(zm/\sqrt{2}\sigma) \})$$

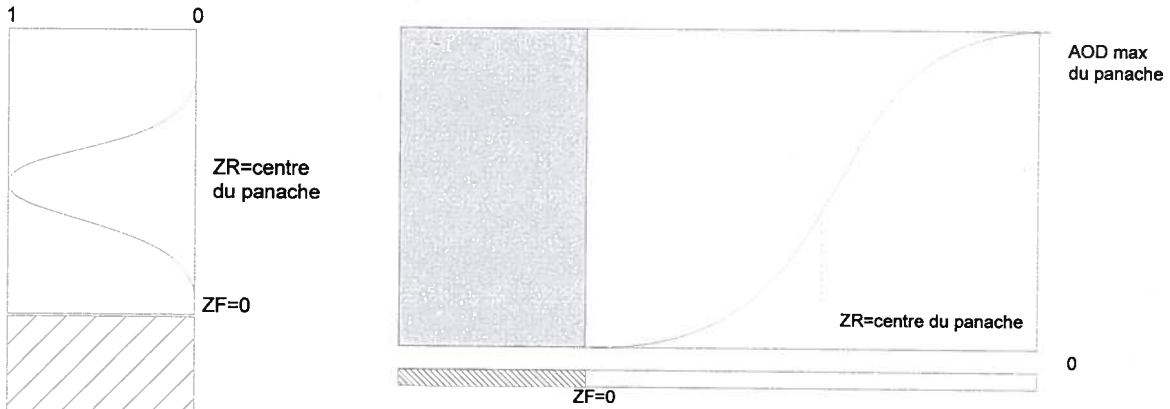


Illustration A- Schématisation du panache

pour étendre cette modélisation à un panache correspondant à une double gaussienne il suffira additionner les deux distributions en répartissant le « poids » total selon les deux gaussiennes c'est-à-dire deux centres Zm_1/Zm_2 , écart-types σ_1/σ_2 et pourcentage 1 et 2 tel que $\text{pourcentage}_1 + \text{pourcentage}_2 = 1$ ainsi :

$$\begin{aligned} \tau_a = & \text{pourcentage}_1 * \sqrt{\pi}/2 \sigma_1 \kappa_0 \{ \text{erf}(zm_1/\sqrt{2}\sigma_1) + \text{erf}(z-zm_1/\sqrt{2}\sigma_1) \} \\ & + \text{pourcentage}_2 * \sqrt{\pi}/2 \sigma_2 \kappa_0 \{ \text{erf}(zm_2/\sqrt{2}\sigma_2) + \text{erf}(z-zm_2/\sqrt{2}\sigma_2) \} \end{aligned} \quad (8.1)$$

Annexe 2 - Simulations HYSPLIT

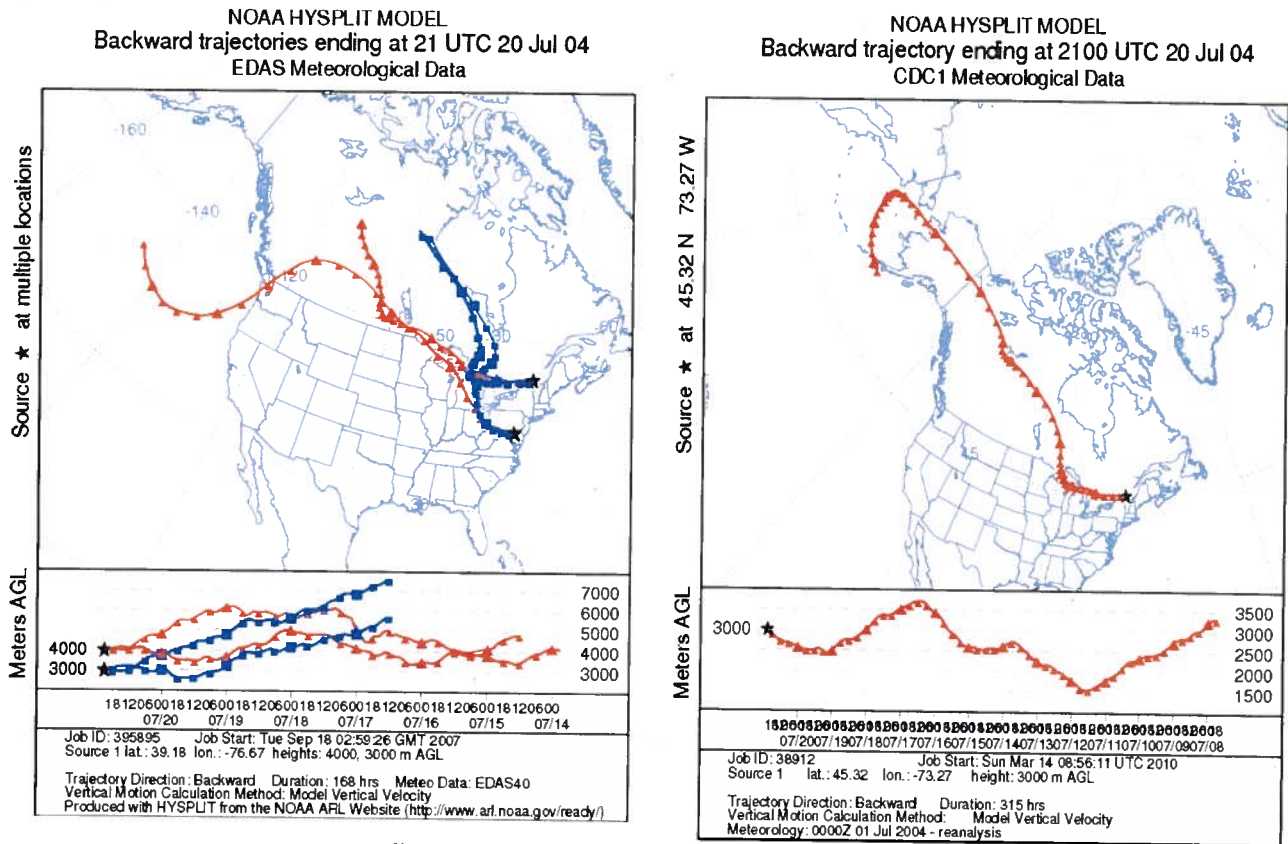


Illustration B - simulations HYSPLIT

Les figures suivantes proviennent de simulations HYSPLIT. Dans la figure de gauche les deux étoiles correspondent à Saint-Jean-sur-Richelieu et Baltimore. On remarque que pour des particules situées à 3 km d'altitude (trajectoire bleue) le modèle fait provenir les particules de la même région à court terme (4 jours avant le passage sur Saint-Jean) ce qui n'est pas le cas pour des particules situées à 4 km d'altitude. Nous rapprochons alors cet événement des feux importants qui ont sévi dans le Yukon, une simulation HYSPLIT plus générale et à plus long terme (celle de droite se termine le 8 juillet 2004) montre que les particules survolent effectivement la région du Yukon. La dernière figure (illustration C) provient du FLAMBE (Fire Locating and Modeling of Burning Emissions) et montre les différents feux répertoriés entre le 8 et le 15 juillet 2004. On remarque que le trajet va effectivement parcourir la zone de l'Alaska et du Yukon où de nombreux feux sévissent (Rectangle rouge dans l'illustration C).

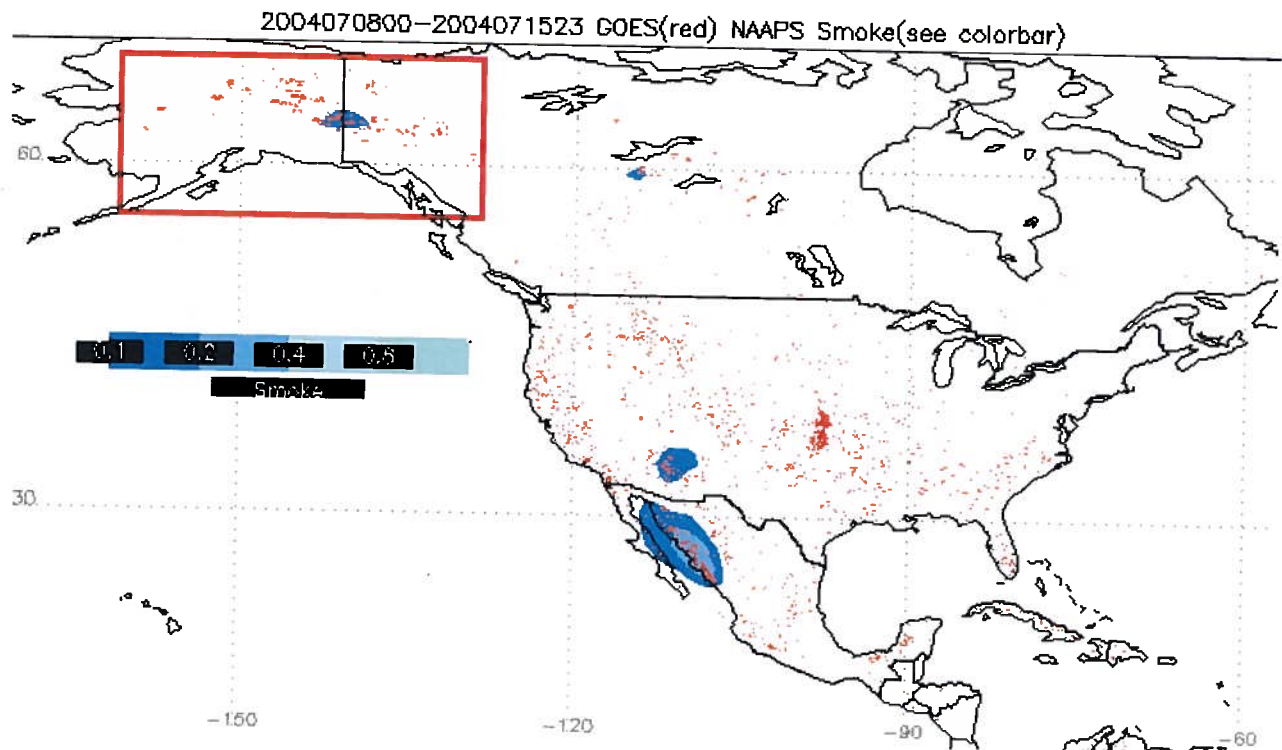


Illustration C: Feux répertoriés avec le modèle FLAMBE Pour la période du 08 au 15 juillet 2004
les points rouges correspondent aux zones de feux actifs recensées durant cette période.

Annexe 3 - Corrections géométriques sur nos images CASI

Pour corriger les images CASI géométriquement il faut:

- Le fichier d'attitude de l'image qui donne, pour chaque ligne de l'image, l'angle du roulis, du tangage et du lacet de l'avion.
- La position GPS de l'avion qui correspondra au centre de nos images une fois corrigées du roulis.
- La dimension équivalente au sol des pixels.

Les trois effets les plus déformants de l'image sont par ordre d'importance le roulis, la résolution du pixel et finalement la position GPS. Généralement le tangage et le lacet sont faibles.

La figure suivante montre les positions GPS des trois trajets.

Sur la figure D, on montre le résultat de la correction géométrique et géographique sur une zone de l'image à 0,67km d'altitude présentant des bâtiments et des parcelles agricoles.



a) image brute



b) image corrigée

Illustration D: Effet de la correction géographique des données CASI, exemple pour pour une zone de l'image correspondant à l'altitude 0,67km.

Outre le changement d'orientation de l'image, qui respecte maintenant la direction Est-Ouest de l'acquisition, on peut remarquer que la plus grande déformation apportée par le roulis est bien corrigée. De manière plus discrète on peut remarquer que les images des bâtiments et des parcelles agricoles paraissent plus longues une fois corrigées et cela est dû à la prise en compte de la résolution du pixel.

Pour un élément de visualisation la correction géographique est assez indispensable, toutefois les multiples étapes de correction amènent à chaque fois un biais supplémentaire sur la mesure.

Si la déformation de l'image est forte il peut y avoir un problème d'échantillonnage de la cible au sol, cependant la correction géométrique dans ce cas risque même d'aggraver ce problème en moyennant les frontières de notre échantillon avec son environnement proche. La solution est donc de sélectionner des surfaces, communes aux trois altitudes, assez larges.

On préférera alors pouvoir échantillonner les images en s'abstenant de faire des corrections géométriques.

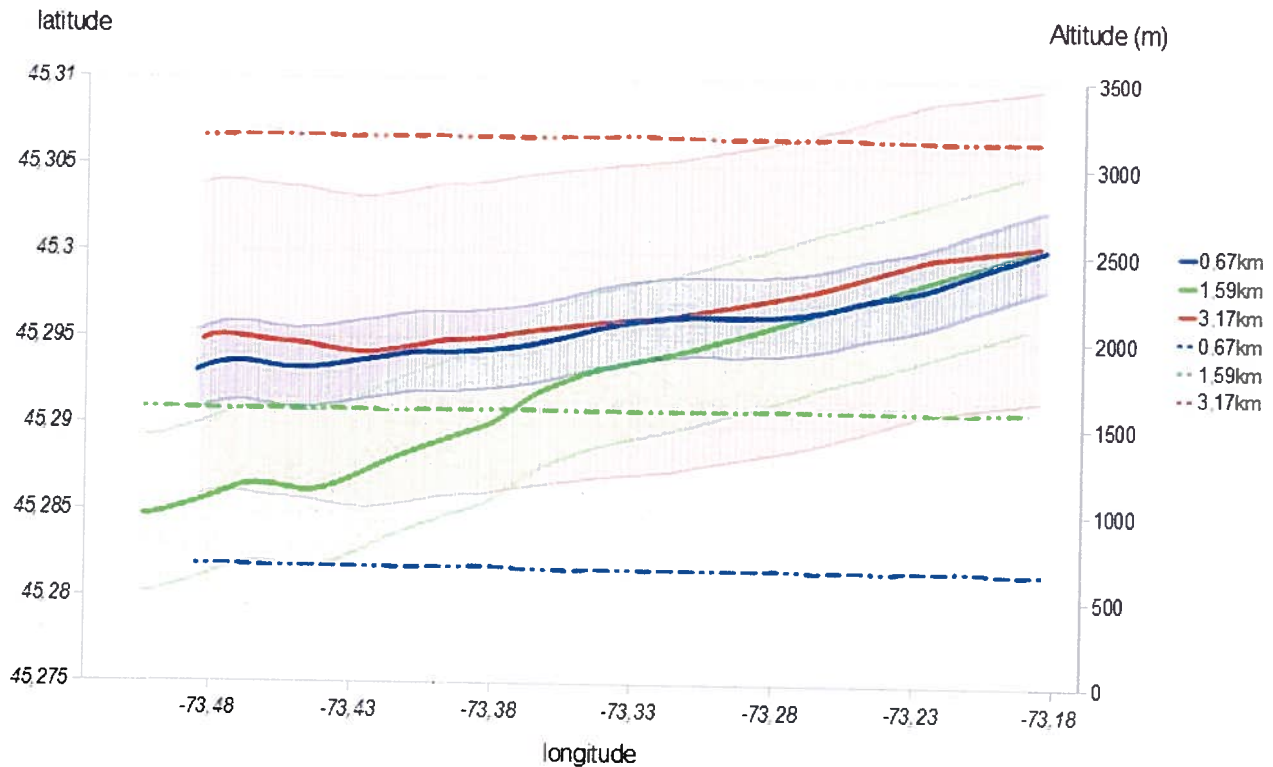


Illustration E - Tracé au sol des images, fauchée du capteur et altitude pour les 3 images CASI

Sur cette figure on a représenté les différentes altitudes et les zones couvertes par les images. On constate que les altitudes, pour les trois altitudes, sont relativement constantes, les variations inférieures à 50 mètres permettent alors de travailler uniquement avec la valeur moyenne calculée pour chaque altitude. En effet les variations d'altitude de l'avion et de relief du sol peuvent difficilement nous permettre de considérer une précision en dessous de la dizaine de mètres (0,01 km). On retrouve sur cette figure aussi le fait que les zones ne se recouvrent pas complètement comme déjà commenté dans le chapitre 3.

**Annexe 4 - Autre considération sur cette étude, ajustement des Luminances apparentes,
Normalisation des luminances, régression multi-altitude des luminances normalisées et
comparaison des erreurs entre régression et RTM standard et non standard**

Normalisation des effets temporels et l'extraction de $R^*(0)$

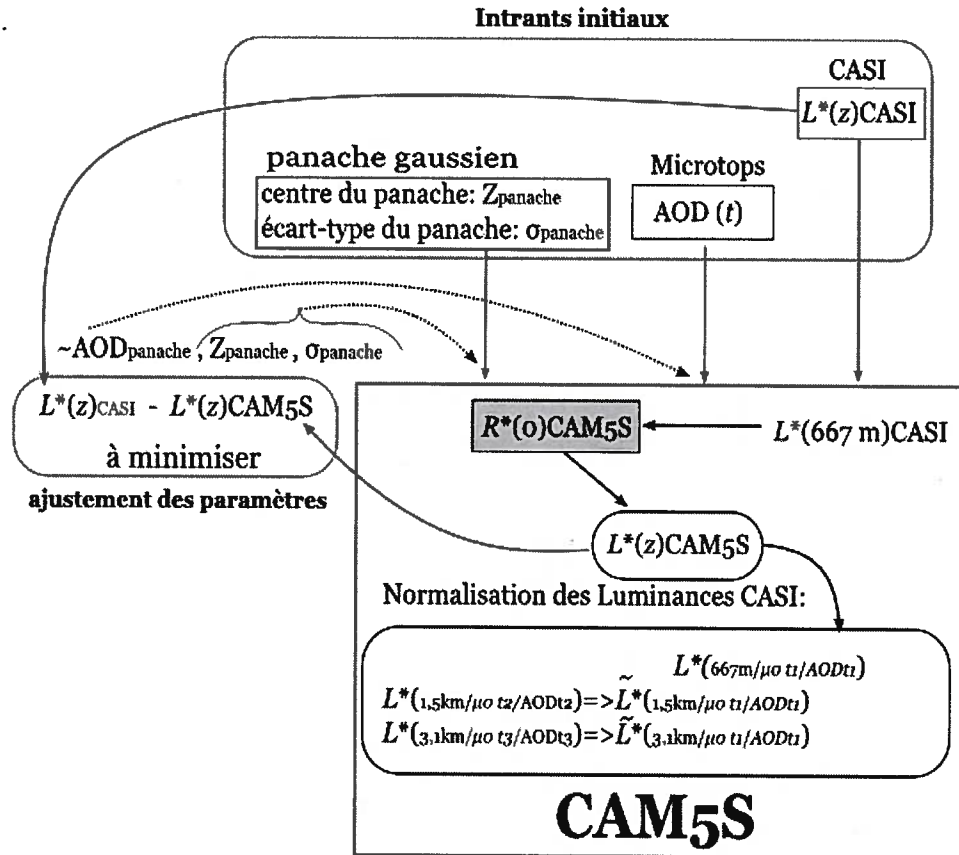


Illustration F: Processus de normalisation des luminances apparentes CASI

La modélisation du panache semble cohérente, et le fait d'avoir fixé l'AOD de background à 0,28 aussi. On rappelle que ce choix nous est finalement déterminé à partir des relevés Microtops. Cependant on est confronté à un problème de généralisation; on peut en effet minimiser l'erreur pour chaque cible cependant il faut essayer de garder une solution globale pour toute notre scène CASI et essayer de conserver les mêmes AOD pour toutes les cibles.

Du point de vue de la perturbation sur l'image MODIS on peut estimer une largeur du panache entre 30 et 35 km de large et notre zone d'étude s'étend au maximum sur 20 km d'Ouest en Est.

Une simulation HYSPLIT nous montre que le passage d'une telle perturbation se ferait en une heure sur la zone le 20 juillet, comme nous l'avons déjà montré.

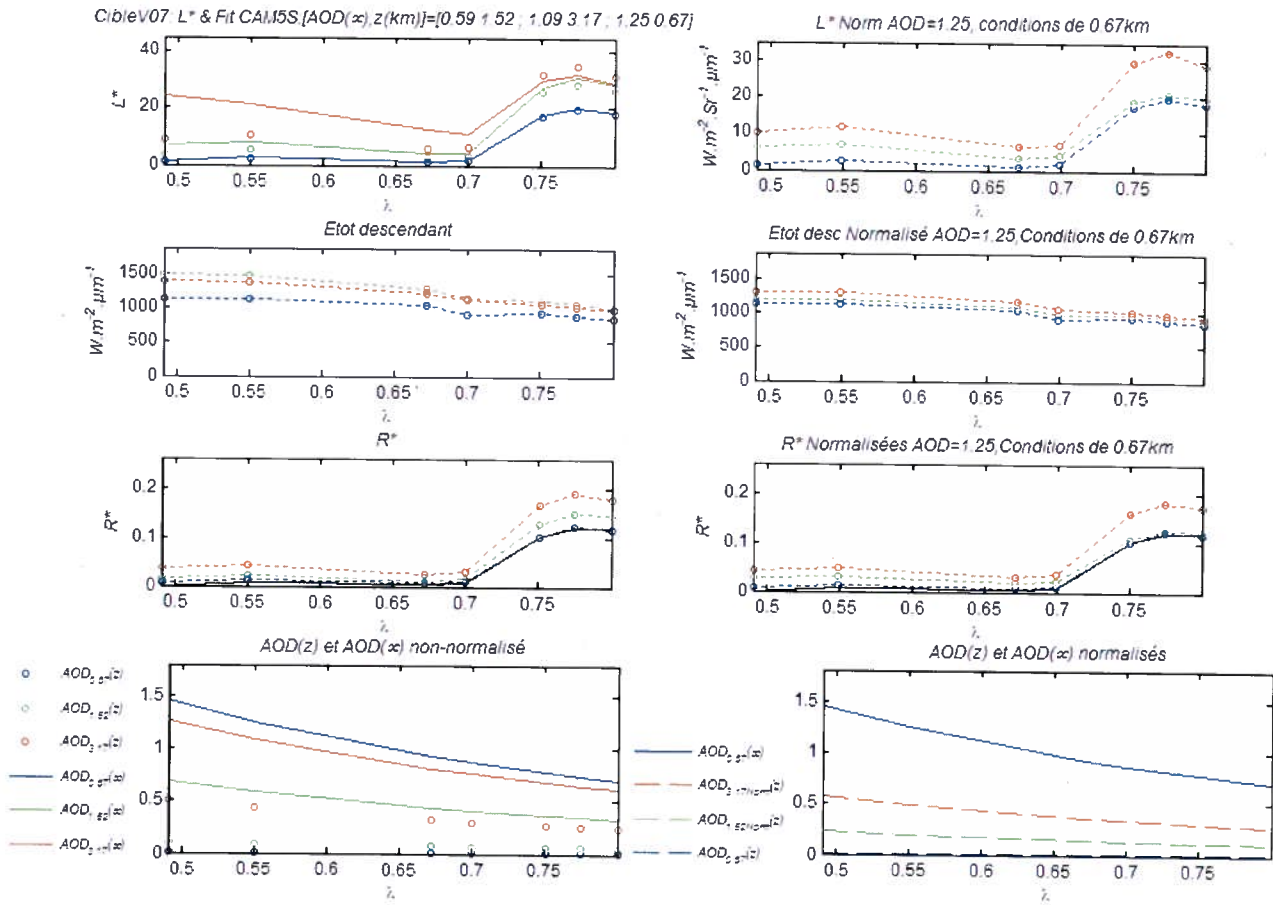


Illustration G: résultats du fit et normalisations pour la cible V07 pour le cas 2

Il faut noter aussi que les cibles sont relativement petites (30 mètres de diamètre) et c'est un paramètre important à prendre en compte lors des simulations, et à appliquer à toutes les cibles car l'environnement avoisinant la cible peut avoir une nature spectrale complètement différent de celle ci et dans ce cas une bonne estimation de la dimension de la cible est plus juste, dans le cas de larges cibles homogènes ce n'est pas gênant de minimiser la taille de la cible au sol. On rappelle que le modèle CAM5S approxime la cible au sol à un disque de rayon R dans les cas d'une cible avec effet de son environnement. La figure suivante montre la réflectance moyenne et celle de l'environnement pour deux cibles basées sur des mesures prises avec la plus basse altitude. On peut remarquer que la cible E02 qui représente une surface d'eau présente un environnement végétal marqué; il n'y a pas de grande différence spectrale entre l'environnement de E02 et la cible V03 par exemple.

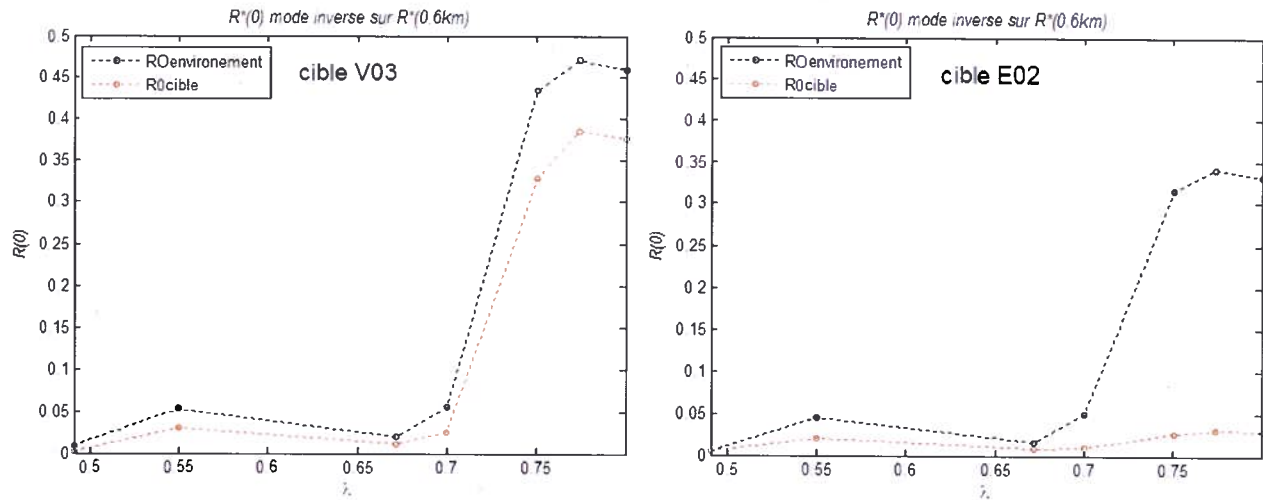


Illustration H: réflectance moyenne de la cible et de son environnement pour E02 et V03

Nous allons étudier selon les données disponibles deux hypothèses qui ont suffisamment de justifications. Soit, les mesures Microtops sont exactes et nous pouvons les utiliser telles quelles, soit, notre approximation sur les valeurs des AODs est correcte et nous pouvons l'utiliser de la même manière. Donc nous allons confronter ces deux cas :

Tableau 8.1 - Deux cas de situation atmosphérique pour l'étude des fits de luminance

	AOD 0,67 km	AOD 1,59 km	AOD 3,17 km
Cas 1	1,25	0,59	1,09
Cas 2	1,35	0,28	0,59

On remarque que : dans notre hypothèse 2, les RMS sont pratiquement toutes inférieures à partir de la cible V03 aux RMS du cas 1, est-ce que ce ne serait pas justement dû au fait que le panache n'est pas sur la zone dans le cas de l'altitude 1,59km?

N'y aurait-il pas une situation atmosphérique particulière au début de nos images CASI?

Il est évident que pour les autres altitudes le panache va être présent et que nos données Microtops montrent un accroissement très significatif de l'AOD.

Par contre les RMS du premier cas ont tendance à être inférieures dans le début de l'image, ce qui concorderait alors avec le fait que le panache entrerait sur notre zone d'étude dès la première altitude et sa limite se situerait peut-être entre la cible E02 et V03.

Un bon compromis alors serait de considérer les deux cas d'épaisseur optique sur notre image CASI sachant que ces deux cas sont correctement justifiables.

Aurait-on un moyen de déterminer l'arrivée de ce panache sur les images?

Les effets des aérosols sont plus importants dans la bande bleue particulièrement s'il s'agit de surfaces sombres comme de la végétation (Kaufmann et al., 1997b).

Si on réalise un transect horizontal de la première bande CASI (490 nm) sur nos 3 altitudes, qui correspond à la moyenne des luminances apparentes prises perpendiculairement pour la même surface au sol (illustration I). Au début de notre zone d'étude nous obtenons la figure suivante pour le début de nos 3 images:

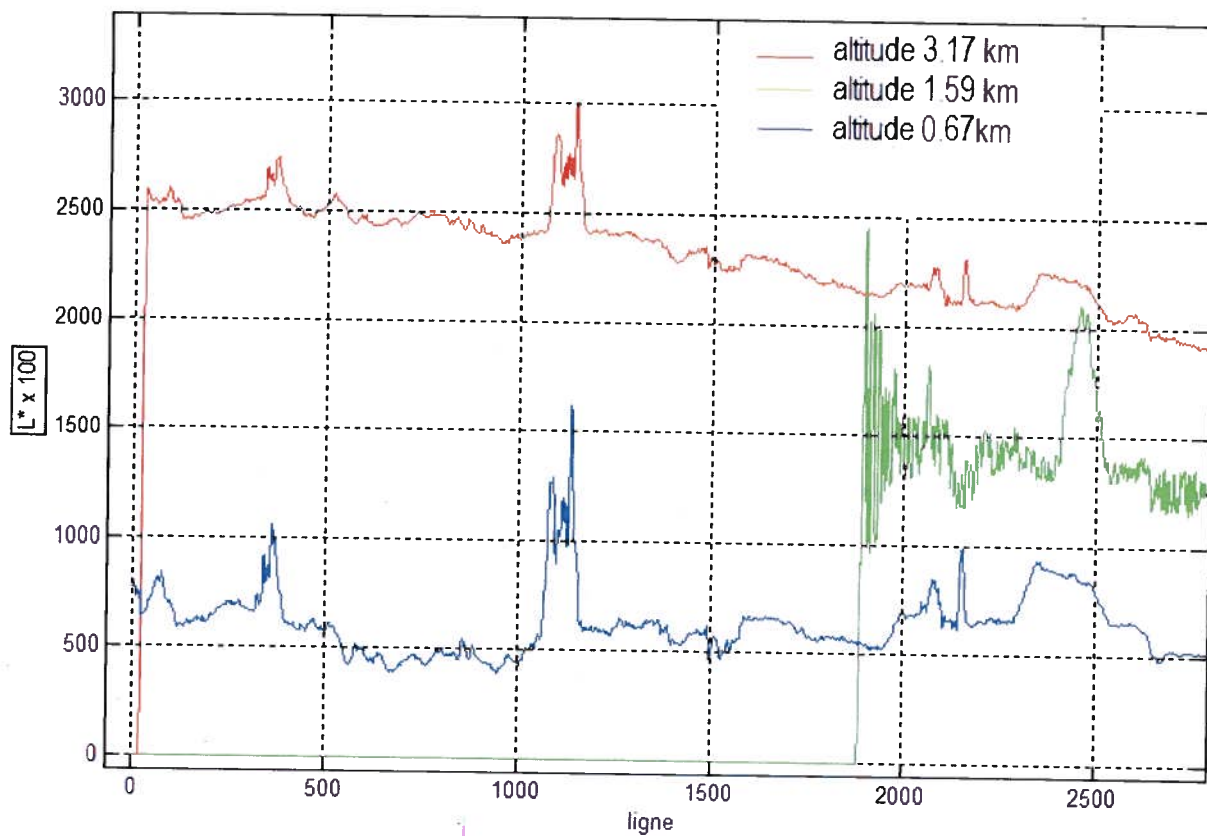


Illustration I: transect effectué sur le début de nos images CASI pour les mêmes zones au sol

Il est important de noter que les surfaces entre les trois altitudes doivent être correspondantes, on travaille alors avec un sous-échantillonnage de nos images orthorectifiées.

On peut déjà noter que l'altitude à 1,59km n'est pas imagée sur ce transect avant environ la ligne 2000, mais nous savions déjà que les 3 altitudes ne se recouvrent pas en début de zone d'étude, le fort bruit observé sur la courbe correspondant à l'altitude à 1,59km est aussi dû au fait que la moyenne est faite avec un échantillon de pixels qui augmentent progressivement en fonction de la couverture du transect par cette altitude. Ce point nous amène à devoir uniquement considérer l'allure de l'altitude à 0,67 et 3,17km pour le début de ce transect. Cependant on peut remarquer que pour une même moyenne relevée sur la plus basse altitude, on a deux moyennes bien distinctes pour la plus haute altitude. En effet, si l'on regarde deux zones entre les lignes 0 à 500 et 2000 à 2500 on remarque que la moyenne pour 0,67km est sensiblement autour de 700 ($L^* \times 100$) alors que pour l'altitude de 3,17km on obtient deux moyennes distinctes respectivement de 2500 et 2200.

ce qui veut dire que pour les mêmes cibles nous avons une luminance apparente plus élevée dans le cas de la plus haute altitude ce qui traduirait une contribution variable de l'atmosphère qui serait plus importante en début d'image.

Considérations sur les cibles claires C12 et C18 :

Après avoir effectué de nouveaux calculs nous avons ajouté un nouvel échantillon à savoir une cible blanche en utilisant un toit de bâtiment provenant de la ferme de l'Acadie. Il se trouve que cette surface est métallique et nous pouvons supposer que c'est aussi le cas pour la cible C12 . Nous avons choisis de prendre une cible à forte luminance et une des raisons pour laquelle elle est forte c'est que le toit est orienté dans le sens de la propagation de l'avion. Il faudrait éviter d'utiliser de telles cibles au comportement spéculaire. Pour exemple le toit de la nouvelle cible C18 est orienté de manière parallèle au trajet de l'avion et présente une RMS moindre que la cible C12. En changeant la cible pour une cible très proche de C12 mais semblant être un toit plat de galerie commerciale, nous faisons chuter considérablement la valeur de la RMS, nous allons donc utiliser en place cette nouvelle cible C12. Nous pouvons voir le résultat de ces RMS à la figure J avec cette nouvelle cible claire C12.

Nous constatons que ce sont bien les valeurs du cas 2 qui donnent le meilleur fit. Pour lever toute ambiguïté nous rappelons la valeur de cette erreur quadratique moyenne:

$$\langle RMS \rangle = \frac{100}{3} \sum_z \left(\sum_{\lambda} \left(\frac{L_{CASI_z}^* - L_{CAMSS_z}^*}{L_{CASI_z}^*} \right)^2 / N \right) = \frac{100}{3} \sum_z \left(\sum_{\lambda} \left(\frac{\Delta L_{FIT}^*}{L_{CASI_z}^*} \right)^2 / N \right) \quad (8.2)$$

En fonction de ce que nous avons montré précédemment, le cas 2 serait plus approprié pour le fit hormis les cibles d'eau et la première cible. Cependant si nous avons détecté l'arrivée du panache sur le début de l'image à 3,17km cela veut dire qu'il faudrait augmenter la valeur de l'épaisseur optique pour cette cible; c'est-à dire que le cas 2 serait valable à conditions d'augmenter la valeur de l'épaisseur optique relevée pour 3,17km. On peut même envisager de lui attribuer la valeur d'AOD entrée pour l'altitude de 0,67km.

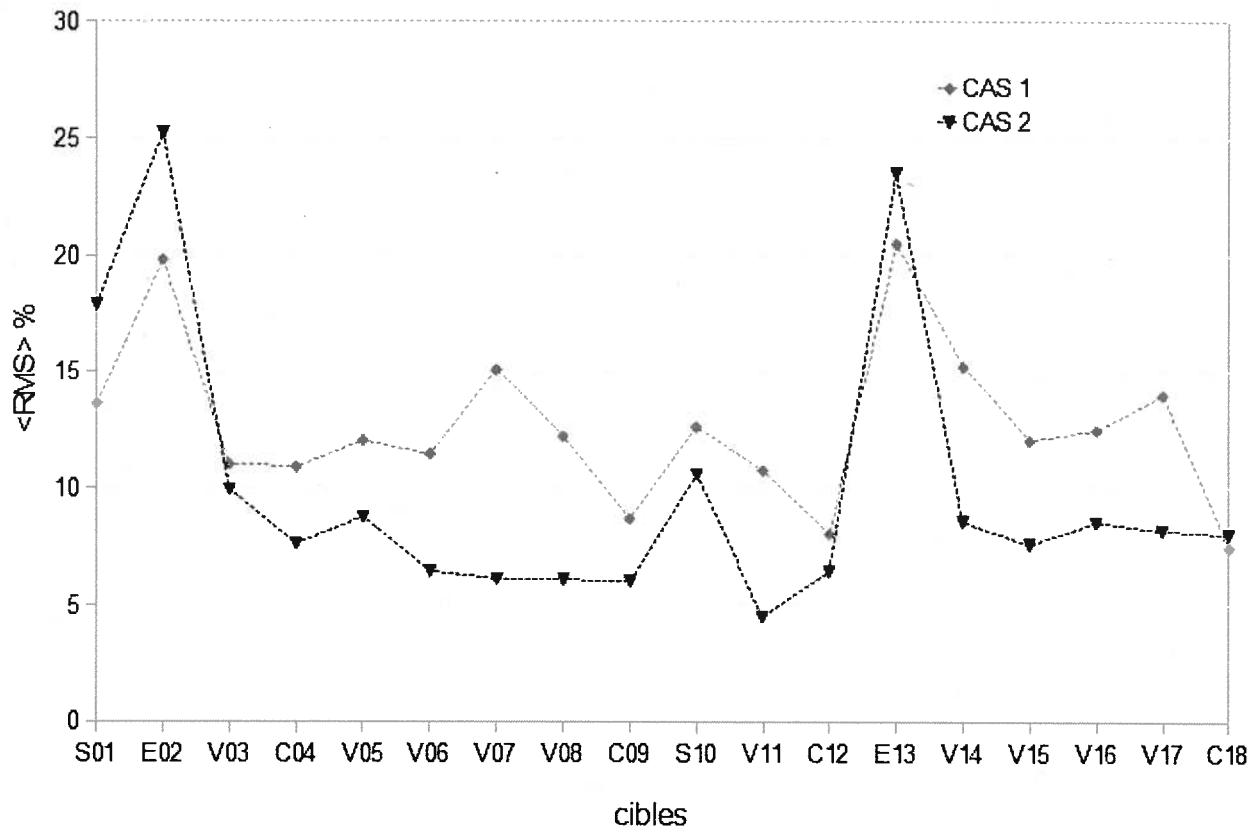


Illustration J: Résultats des fits sur nos cibles avec les deux cas présentés au tableau 8.1

Un premier calcul sur cette cible avec ces valeurs c'est à dire respectivement 1,35,0,28 et 1,35 pour 0,67, 1,59 et 3,17 km donne une RMS de 13,5% améliorant la valeur de 17,9%.

Le but serait de montrer les résultats sur les luminances afin de les préparer pour le modèle d'erreur de Martin Bergeron, c'est-à-dire établir un estimât de la réflectance au sol.

Établissement de l'AOD aussi dans une situation aussi perturbée comme c'est un des intrants principaux il faut aussi qu'il donne une cohérence au profil de panache déterminé selon les données auxiliaires.

Pour certaines cibles avec le bon AOD et la bonne réflectance au sol on peut estimer l'erreur.

L'AOD de normalisation c'est celui que l'on a déterminé pour 0,67km avec notre normalisation; C'est juste l'AOD qui permet d'aller chercher le $R^*(0)$, le choix de la plus basse altitude malgré la forte épaisseur optique a été orienté par le fait que la plus basse altitude donnait une valeur de réflectance apparente proche de la valeur qui aurait été prise au sol.

Si on a une analyse de sensibilité à faire sur cet intrant pour reprendre le modèle de Martin il faut faire varier l'AOD et par là même le résultat de la normalisation : Effet faible certainement car essentiellement dominé par l'ajustement des bonnes heures d'acquisition avec les luminances, mais effet à montrer cependant. Les travaux de Martin Bergeron (2005) rappellent que les intrants sont la principale source d'erreur, la sensibilité de la correction dans notre cas est essentiellement dépendante de l'AOD déterminé, mais cet AOD peut être aussi ajusté pour faire correspondre le plus possible les 3 luminances aux 3 altitudes.

La difficulté sera donc de retrouver la bonne modélisation du profil d'AOD en terme de profil d'épaisseur optique dans le modèle de panache de fumée afin de retrouver une évolution des luminances apparentes modélisées similaire à ce que nous observons avec les luminances CASI. Il faut tester la robustesse de cette modélisation qui doit d'ailleurs dépendre du type de perturbation observée: Étudier différentes formes de panache/étendue/types d'aérosols.

Pour la régression il est primordial que les luminances apparentes aient une progression logique.

C'est à dire qu'une fois la normalisation effectuée sur les luminances apparentes CASI, la luminance apparente pour l'altitude 1,59 km doit toujours être située entre celle de 0,67 km et 3,17 km.

Si tel n'est pas le cas, nous aurons des résultats aberrants pour la régression multi-altitude sur ces luminances normalisées.

C'est pourquoi nous nous sommes rendus compte que favoriser la minimisation de l'erreur en modifiant les AODs même avec suffisamment d'arguments ne permettait pas d'obtenir une régression correcte.

Si l'on respecte les valeurs d'AOD trouvées avec le Microtops, c'est-à dire respectivement en fonction des altitudes : 1,25 , 0,59 et 1,09. Les luminances normalisées sont plus cohérentes malgré l'augmentation de l'erreur relative pour le fit.

par exemple pour la cible V11 on a l'erreur relative sur le fit qui passe de 4.54 à 10,75 si on change la valeur des AODs initiaux de 1,35/0,28/1,09 à 1,25/0,59/1,09.

Certes le premier cas de valeurs d'AODs (1,35/0,28/1,09) minimise l'erreur sur l'ajustement des luminances mais le but principal est d'obtenir une régression sur ces données qui soit cohérente, il faut donc privilégier cette orientation dans les résultats, tout en gardant une cohérence sur les valeurs des intrants ce qui est respecté dans le cas présent puisque nous considérons les valeurs initiales relevées avec le Microtops.

Ce qui nous donne par exemple les résultats exposés à la figure suivante pour la cible V11 en ce qui concerne l'ajustement des luminances et la normalisation:

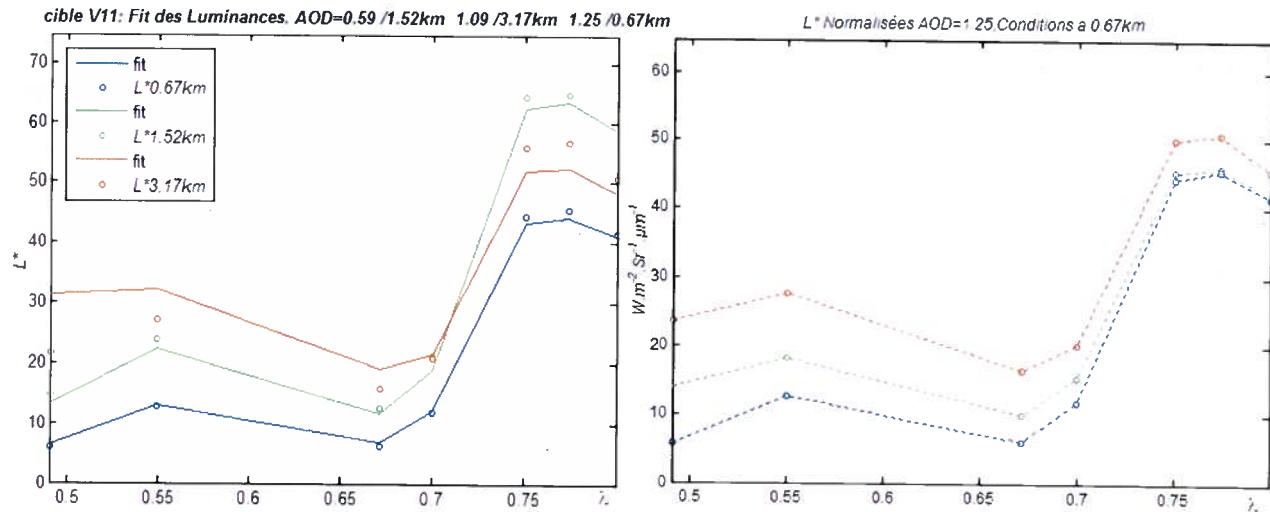


Illustration K: ajustement et normalisation des luminances apparentes CASI pour la cible V11 aux conditions d'épaisseurs optiques telles que relevées avec le Microtops.

par conséquent nous trouvons les valeurs suivantes avec la régression multi-altitude pour $R^*(0)$:

Tableau 8.2: valeur de $R^*(0)$ obtenue par régression multi-altitude

Lambda (μm)	0,49	0,55	0,67	0,7	0,75	0,77	0,8
$R^*(0)$	-0,01	0,03	0	0,05	0,32	0,35	0,33

Cette réflectance sert alors de base pour comparer la correction avec modélisation c'est à dire CAM5S avec la singularité modélisée et CAM5S standard pour la plus haute altitude CASI

ce qui nous donne les deux réflectances apparentes au sol suivantes :

Tableau 8.3: Valeurs de réflectance apparente pour la cible V11 pour les deux configurations de CAM5S

Lambda (μm)	0,49	0,55	0,67	0,7	0,75	0,77	0,8
$R^*(0)$ CAM5Spanache	-0,02	0,03	0,02	0,06	0,23	0,24	0,24
$R^*(0)$ CAM5S standard	-0,11	-0,03	-0,02	0,03	0,22	0,24	0,23

On remarque que nous avons des valeurs négatives de réflectance apparente, ce qui n'a pas de réalité physique.

Si dans le cas de la régression multi-altitude on peut attribuer cela au biais que nous nous sommes imposé de garder vis-à-vis de l'ajustement des luminances apparentes qui peut être important surtout dans le cas où il est estimé de telle façon que la normalisation des luminances apparentes ait une progression cohérente. Cette répercussion serait acceptable dans la mesure où elle ne s'étendrait pas aux autres bandes spectrales. On remarque que c'est le cas pour la réflectance obtenue avec modélisation du panache mais que nous n'obtenons pas cette condition pour la modélisation standard de CAM5S. Cette constatation peut déjà être un élément révélateur de l'erreur relative que nous allons calculer par la suite.

Nous avons alors pour ces deux cas, l'erreur relative par rapport à la réflectance obtenue par régression multi-altitude:

$$dR^*(0) = \sqrt{\sum_{\lambda} \frac{(R^*(0)_{regression} - R^*(0)_{CAM5S})^2}{N}} \quad (8.3)$$

Avec bien-sûr dans l'équation 1 avec le CAM5S standard ou celui avec la modélisation du panache

Ce qui donne comme résultat pour $dR^*(0)$ de 0,063 pour le cas avec modélisation du panache et de 0,081 dans le cas contraire. Ainsi l'erreur est minimisée dans le cas de la modélisation du panache de près d'un tiers portant celle-ci à 6,3% d'erreur sur l'estimation de la réflectance apparente. Dans le sens où l'on considère bien entendu la réflectance obtenue par régression multi-altitude comme étant notre référence.

Cette valeur des AODs pour la cible V11 est justifié par la proximité de cette cible avec la mesure Microtops. Toutefois ces valeurs figées des AODs ne permettent pas de satisfaire une évolution correcte des luminances apparentes normalisées pour toutes les cibles par conséquent il a fallu ajuster les AODs pour permettre cette condition.

Conclusion

Pour généraliser ces résultats aux autres cibles, il apparaîtrait rapidement que l'évolution correcte des réflectance ne pourra pas être respectée si l'on ne modifie pas les valeurs des AODs pour chaque altitude. Nous avons montré qu'il y avait une variation de l'AOD durant l'acquisition des images ce qui

nous permet alors dans une certaine mesure de faire varier cette valeur non seulement au niveau horaire mais aussi d'une manière géographique en fonction de la position de la cible sur la zone d'étude. Si les valeurs directement lues au Microtops fonctionnent pour la cible V11 c'est justement que cette cible se trouve à proximité de la mesure photométrique. L'ajustement des AODs pourrait aussi se faire en respectant le fait que d'Ouest en Est on aura une augmentation de l'AOD. Ce qui va nous permettre une certaine variation en fonction de la position géographique de la cible.

Nous pouvons attribuer ces erreurs à la multitude de paramètres libres dont nous maîtrisons peu ou mal les variations. On peut aussi critiquer le fait qu'il y a certainement un problème de cohérence dans la comparaison entre le modèle d'obtention des réflectances au sol de validation à la modélisation très simple et le modèle CAM5S qui est un modèle beaucoup plus complexe. $R^*(0)_{\text{validation}}$ n'est certainement pas le meilleur choix de référence au sol, ne serait-ce qu'en partie à cause des valeurs négatives constatées ; de plus la régression favorise la convergence des paramètres principaux de telle manière que la prise en compte de la variation non-homogène des AODs n'est pas respectée.

Un point essentiel concerne aussi le fait que l'on s'éloigne d'une méthode simple avec cette multiplication de suppositions, de paramètres libres à évaluer et de confrontation de modèles différents. L'interprétation des résultats bien que permettant d'extraire des éléments de réponse pertinents ne va pas nous permettre d'extraire une information suffisante ; surtout dans le cas où l'objectif principal serait de permettre des corrections atmosphériques adéquates de nos données. Un dernier point porterait sur le fait que cette méthodologie particulière nécessiterait d'être rodée dans des cas standard d'atmosphère classique afin de pouvoir ensuite étendre l'étude à des cas radiométriquement complexes comme celui-ci.

C'est pourquoi nous ne proposerons pas cette approche pour la problématique nous concernant.

Annexe 5 - Modélisation de la double Gaussienne dans CAM5S -codage

Nous disposons d'une version de CAM5S en FORTRAN

cette modélisation du panache est incluse dans la procédure ODA550.F qui a pour but principal d'extraire la valeur de l'épaisseur optique à l'altitude z donnée, ainsi en terme de fichier d'entrée il n'y a pas de modification de CAM5S, le calcul se fera entièrement dans cette procédure. (sachant que l'on aura paramétré le modèle pour des aérosols de biomasse brûlée).

La majeure partie du code à inclure est le suivant pour exprimer l'épaisseur optique à l'altitude en terme de double gaussienne (le code ci-dessous est paramétré pour le panache 1):

```

CENTER=3.75 !centre du premier panache en km
MUPLUME=1.1 !écart-type de la gaussienne en km
CENTER2=3.75 !centre deuxième panache
MUPLUME2=0.5 !écart-type deuxième panache
PERC1=0.75    ! pourcentage du premier panache
PERC2=0.25    ! pourcentage du deuxième panache
TAER55N = TAER55 !ajout d'une nouvelle variable
TBACK = 0.28 ! valeur de l'AOD de background
TAER55= TBACK
TPLUME2 = PERC2*(TAER55N – TBACK) ! Pondération des panaches
TPLUME = PERC1*(TAER55N - TBACK)
PI=3.1415
AE=-(8*(PI-3))/(3*PI*(PI-4)) ! coefficient de l'approximation de la fonction d'erreur
ZR=(ZF-CENTER)/(SQRT(2.0)*MUPLUME) ! pour le premier panache
ZM=CENTER/(SQRT(2.0)*MUPLUME)
ZR2=(ZF-CENTER2)/(SQRT(2.0)*MUPLUME2) ! pour le deuxième panache
ZM2=CENTER2/(SQRT(2.0)*MUPLUME2)
ERFZR=SQRT(1-EXP(-ZR**2*((4/PI+AE*ZR**2)/(1+AE*ZR**2))))
ERFZM=SQRT(1-EXP(-ZM**2*((4/PI+AE*ZM**2)/(1+AE*ZM**2))))
ERFZR2=SQRT(1-EXP(-ZR2**2*((4/PI+AE*ZR2**2)/(1+AE*ZR2**2))))!pour le deuxième panache
ERFZM2=SQRT(1-EXP(-ZM2**2*((4/PI+AE*ZM2**2)/(1+AE*ZM2**2))))
IF (ZR.LT.0.0) ERFZR=-ERFZR ! Approximation définie de 0 à l'infini positif
IF (ZM.LT.0.0) ERFZM=-ERFZM !idem for ERFZM
IF (ZR2.LT.0.0) ERFZR2=-ERFZR2
IF (ZM2.LT.0.0) ERFZM2=-ERFZM2 !idem for ERFZM2
ERFSUM=(1/(1+ERFZM))*(ERFZR+ERFZM) ! La première gaussienne
ERFSUM2=(1/(1+ERFZM2))*(ERFZR2+ERFZM2) ! La deuxième gaussienne

```

Annexe 6 - Considérations techniques sur le fonctionnement de CAMSS et les entrées standard du modèle

CAM5S fonctionne avec un fichier d'entrée standard qui n'admet qu'une forme standardisée des données. Afin de ne pas avoir à trop modifier le code du modèle nous avons dû effectuer quelques ajustements pour utiliser correctement ce transfert radiatif.

En effet, que le modèle fonctionne en mode direct ou inverse, l'entrée principale de CAM5S doit être une réflectance, c'est à dire une réflectance apparente à l'altitude dans le cas inverse ou une réflectance apparente au sol dans le cas direct. Pour déterminer celle-ci nous construisons une réflectance apparente à l'altitude initiale qui nous sert dans un premier temps à extraire la réflectance apparente aux altitudes. Cette étape intermédiaire, non essentielle pour la compréhension de notre situation radiative, est cependant nécessaire puisque nous n'avons accès qu'aux luminances apparentes avec nos images CASI. En effet CAM5S nécessite de construire des réflectances apparentes à partir des luminances et des éclairagements aux altitudes, mais les éclairagements ne sont pas connus ni mesurés initialement avec nos images CASI. Pour palier cette lacune, on construit une première réflectance apparente avec un éclairage simulé moyen (les point bleus sur la figure suivante) qui va permettre d'extraire ensuite, grâce à une seconde simulation CAM5S tenant compte du panache, les éclairagements correspondants aux conditions simulées dans le modèle. C'est à dire que l'on fait fonctionner le modèle en mode direct. Ces nouveaux éclairage simulés cette fois sont utilisés alors pour construire les réflectances aux altitudes $R^*(z)$ à partir des luminances CASI (les courbes rouges). On note bien les différences entre ces deux spectres, qui bien que limitées (les réflectances construites initialement de manière empirique ne sont pas si erronées) représentent tout de même un biais que nous avons éliminé. On aura alors comme point de départ des réflectances apparentes aux altitudes construites avec les luminances apparentes CASI et des éclairagements aux altitudes simulés par CAM5S.

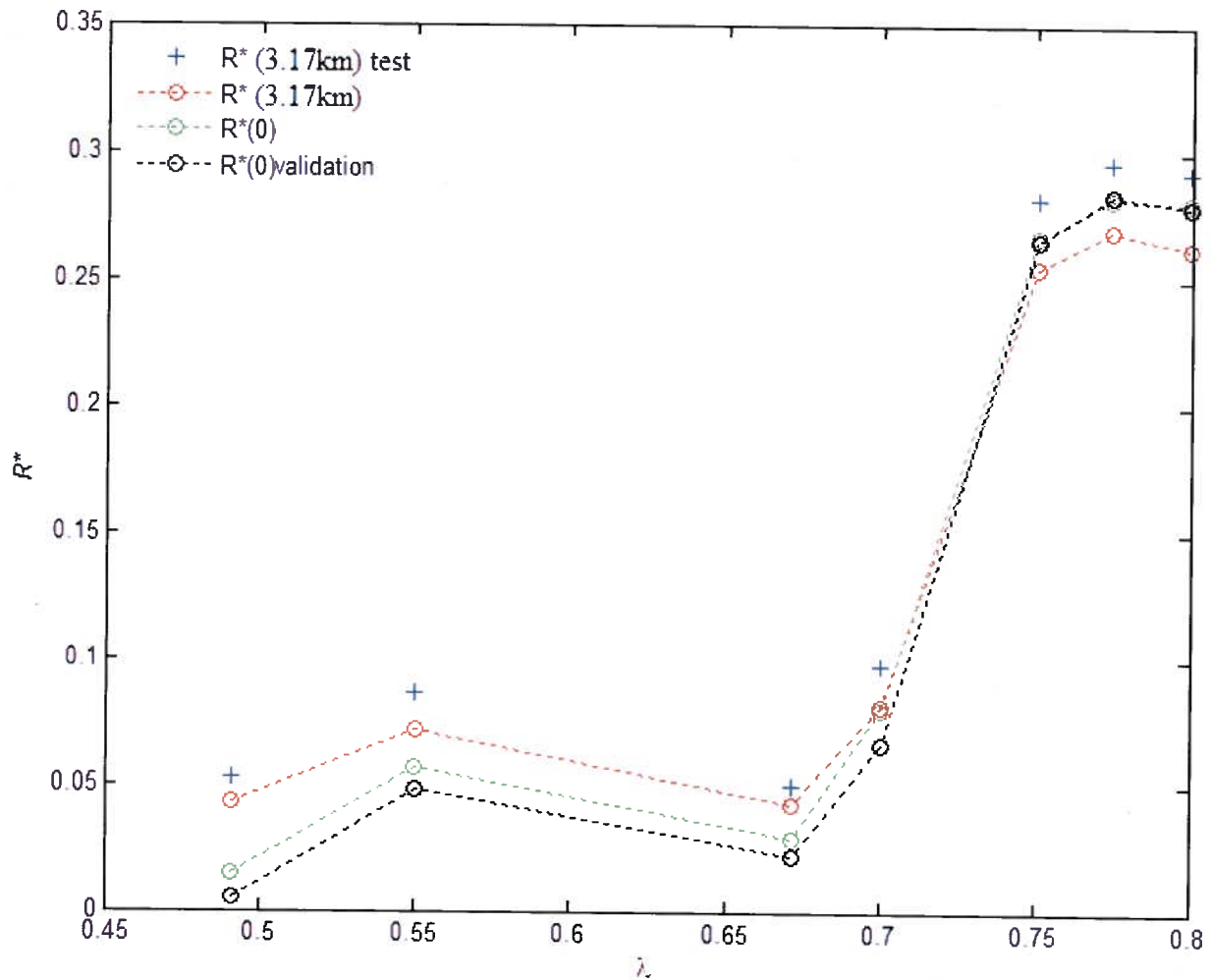


Illustration L: détermination de la réflectance apparente à l'altitude 3,17km pour la cible V11

Pour confirmer ce point on montre dans l'illustration suivante que les éclaircissements ne sont pas (dans le cas standard) ou peu (dans le cas non standard) affectés par la variation de $R^*(0)$. Ainsi l'illustration suivante montre les éclaircissements descendants normalisés par rapport à l'éclaircissement solaire exo-atmosphérique, résultant de deux $R^*(0)$ différents avec le même environnement et cela pour l'altitude la plus basse 0,667km et l'AOD à 550nm le plus fort: 1,25 ; donc dans le cas où l'effet de la réflectance apparente au sol est le plus important dans notre étude.

Dans le cas standard il n'y a pas de variation de l'éclaircissement descendant pour deux différentes réflectances apparente au sol, et les deux tracés sont complètement confondus, on ne distingue pas la courbe rouge de la bleue. On rappelle que ce sont des éclaircissements normalisés, donc l'absence de

variation indique que dans ce cas nous avons environ 85% de la valeur de l'éclairement exo-atmosphérique sur tout le spectre. Dans le cas non standard, même une forte variation de la réflectance apparente au sol, ce qui est le cas dans le proche infra-rouge pour ces deux cibles (une comparaison entre V11 et V06), n'apporte qu'une faible variation de l'éclairement descendant résultant lors des simulations. Ce qui apporte alors encore plus de validité à notre méthodologie.

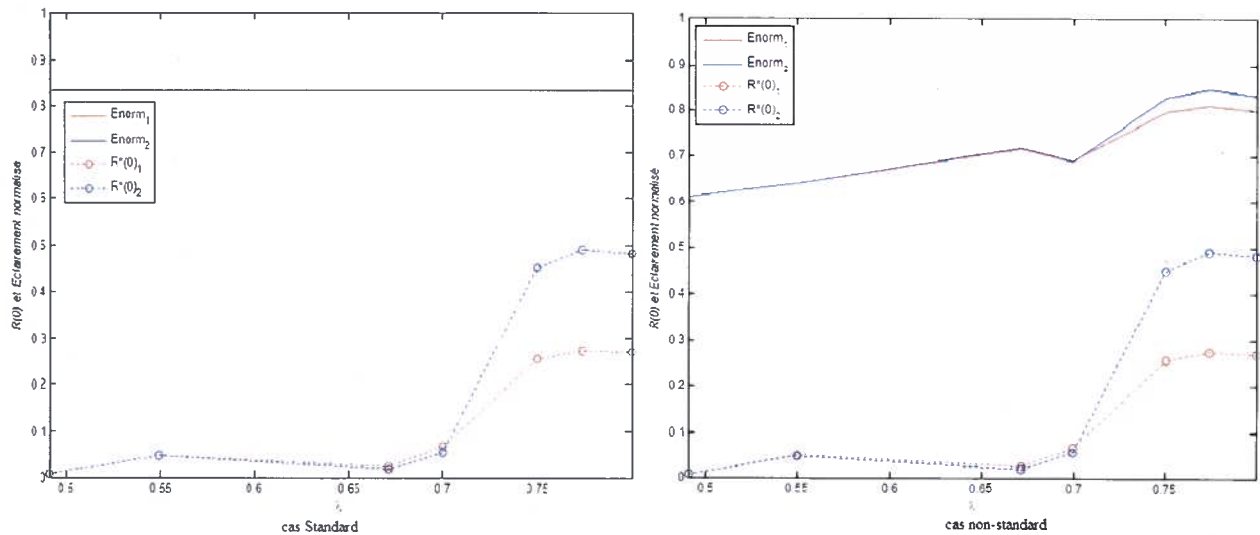


Illustration M: comparaison des éclaircissement totaux descendants normalisés dans le cas standard et non standard pour deux réflectance apparentes au sol

Un deuxième point concernera les environnements de nos cibles, pour les mêmes raisons l'environnement de la cible sera entré en terme de réflectance apparente au sol, il faudra alors les déduire pareillement. De plus nous présentons un exemple de spectre de cible et de son environnement pour montrer les différences parfois remarquées entre ces deux spectres (comme discuté à la section 5.4.).

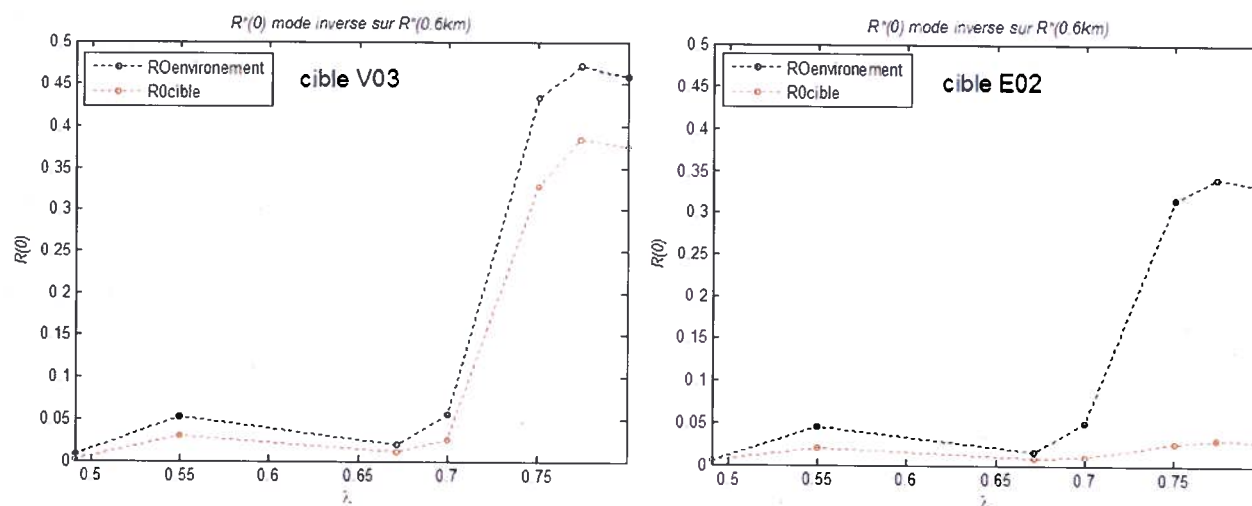


Illustration N: différence spectrale entre cible et environnement pour deux cibles de type différente (V03:“végétation“, E02:“Eau“)

Annexe 7 - Comparaison entre correction atmosphérique standard et celle non-standard tenant compte de la modélisation du panache pour les 18 cibles choisies

Dans cette annexe, nous proposons de montrer tous les résultats dont sont issues les courbes de nos figures de résultats généraux dans le chapitre 5. Nous montrons donc les 18 résultats obtenus avec nos cibles test avec la modélisation du panache 1 implémenté dans le cas standard et non-standard. Le lecteur pourra alors se référer pour chaque point de la figure 5.6 par exemple à l'illustration correspondante qui donne le spectre de la réflectance apparente à l'altitude 3,17km et la réflectance apparente au sol de validation construite avec la plus basse altitude. Les réflectances obtenues avec le modèle standard, ainsi qu'avec le modèle non-standard pour la réflectance apparente à 3,17 km sont également montrées sur chaque graphique.

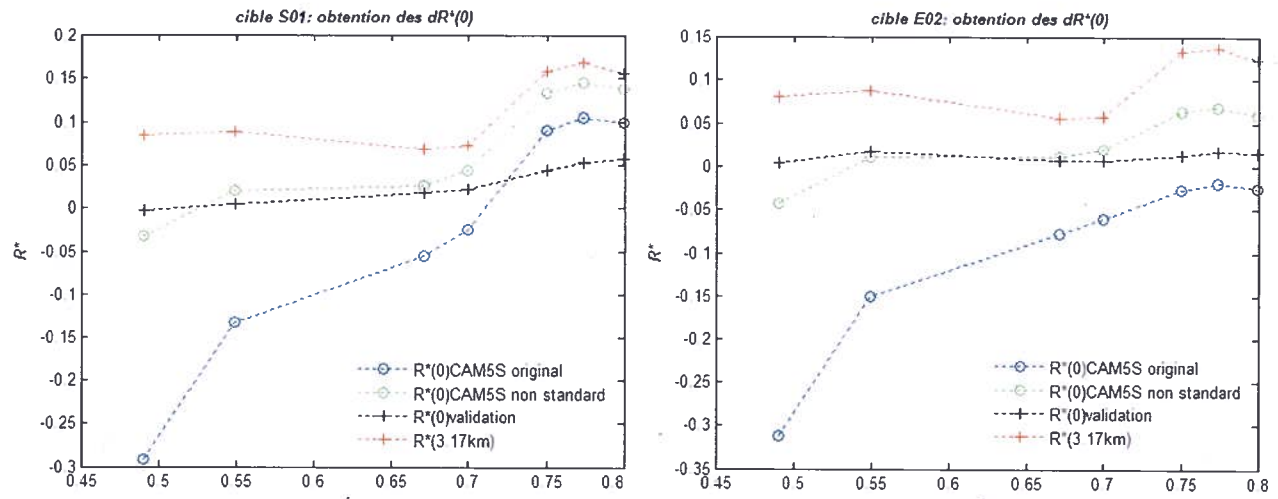


Illustration O: cible S01 et E02

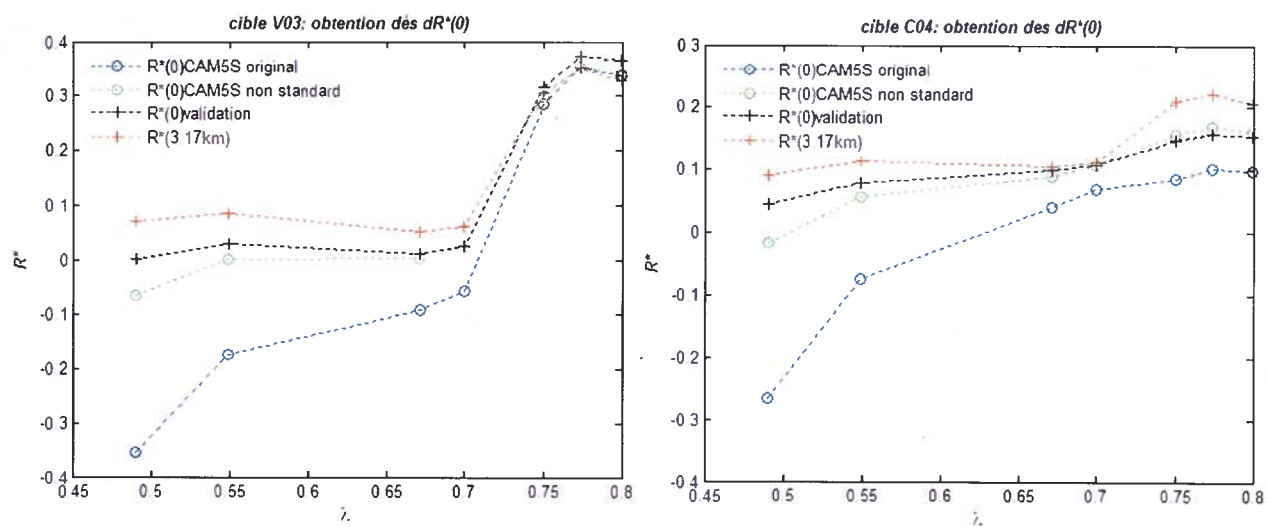


Illustration P: cible V03 et C04

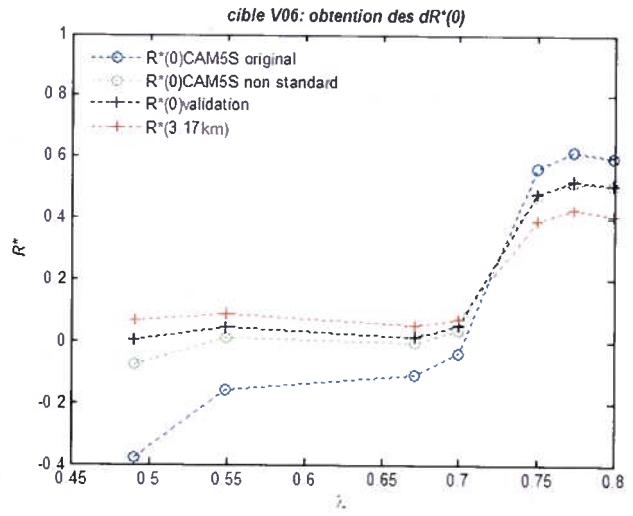
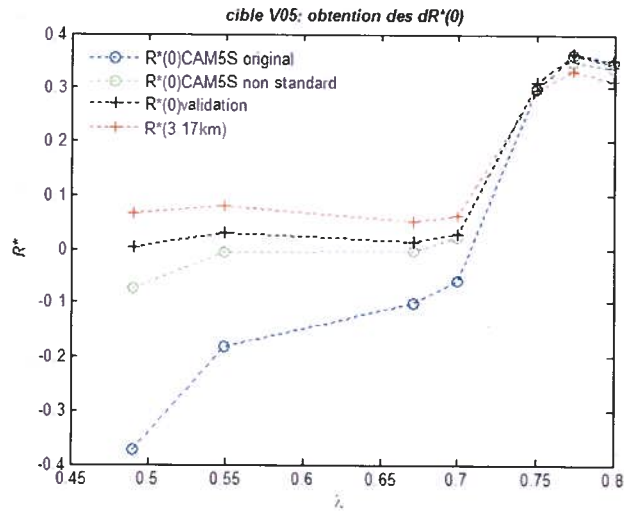


Illustration Q: cible V05 et V06

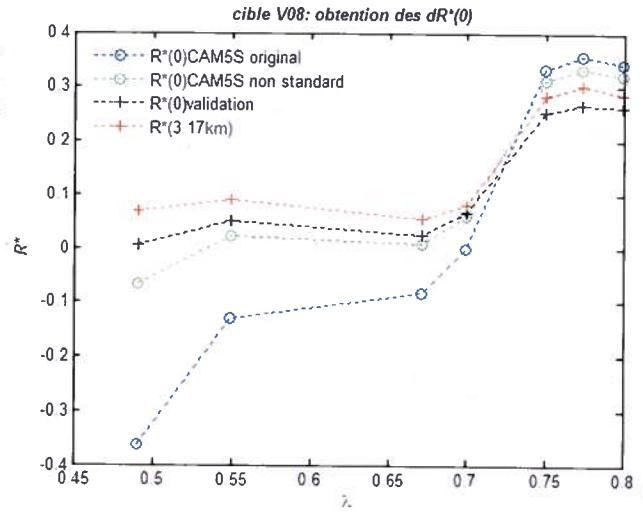
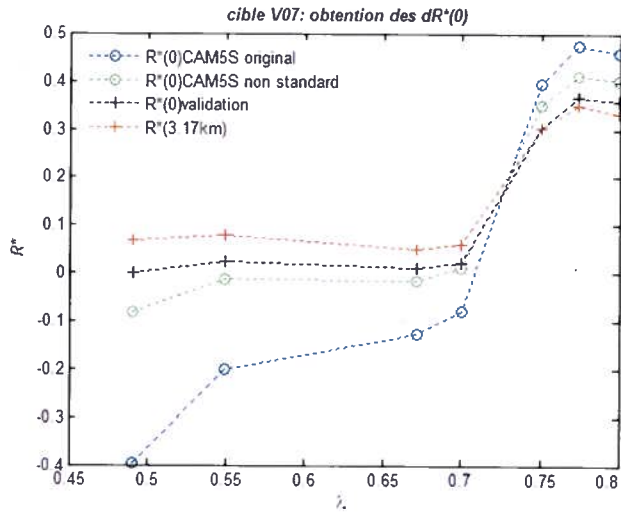


Illustration R: cible V07 et V08

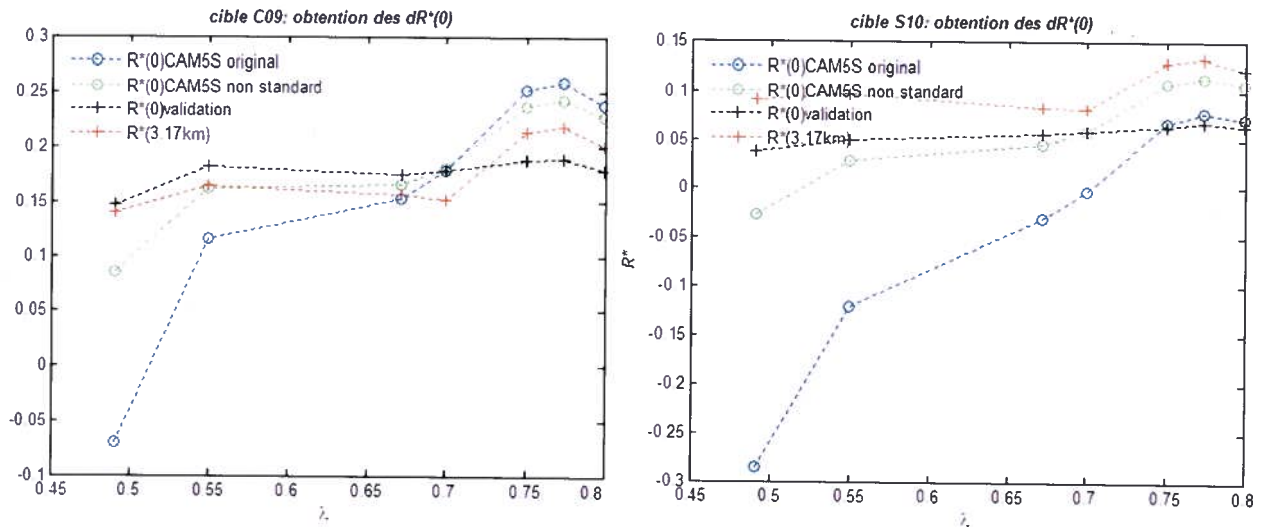


Illustration S: cible C09 et S10

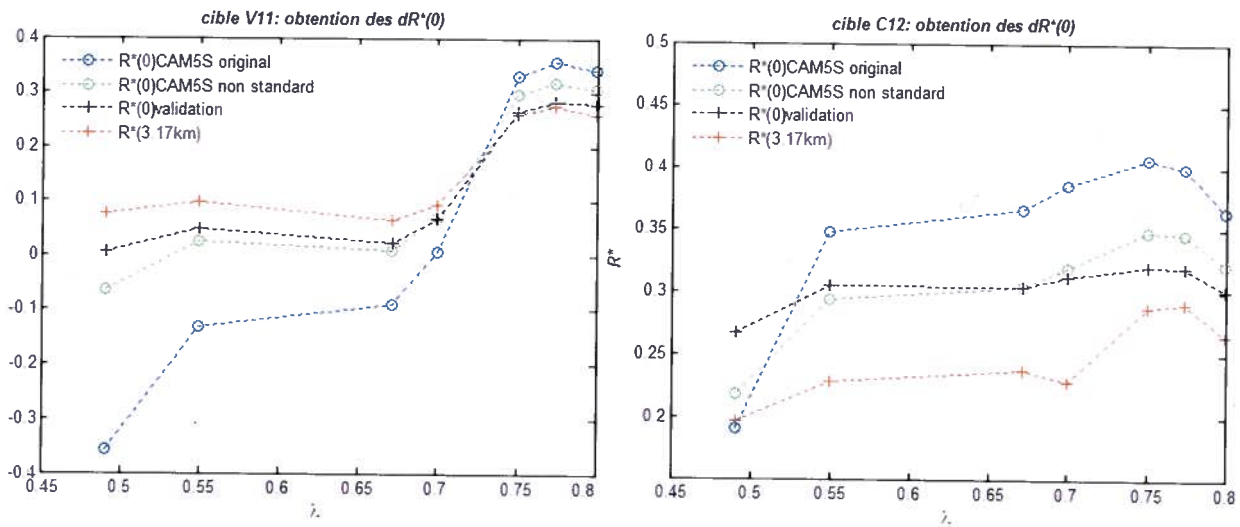


Illustration T: cible V11 et C12

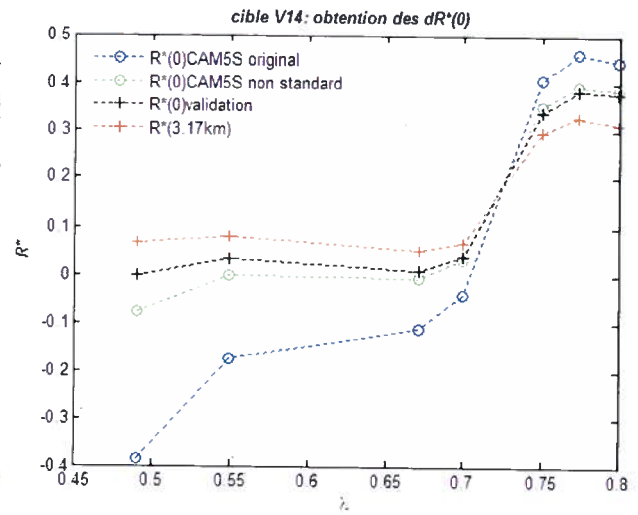
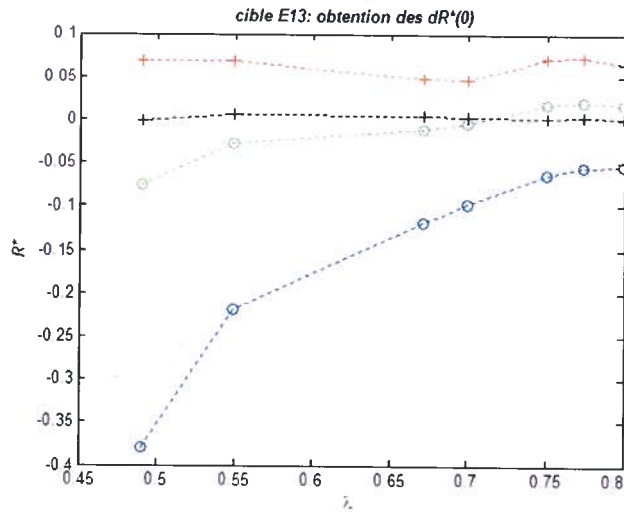


Illustration U: cible E13 et V14

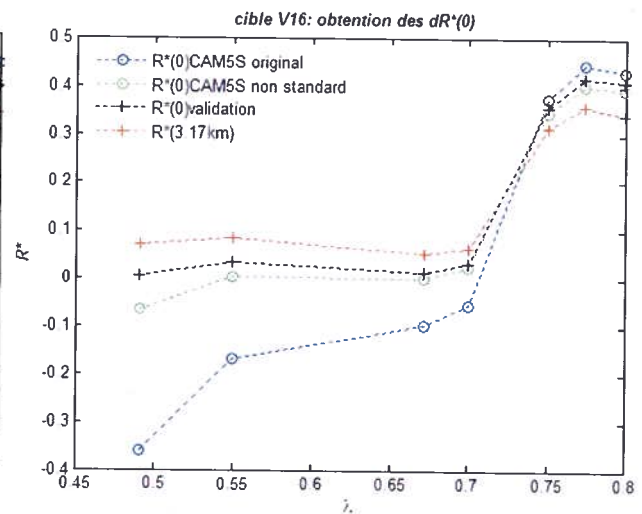
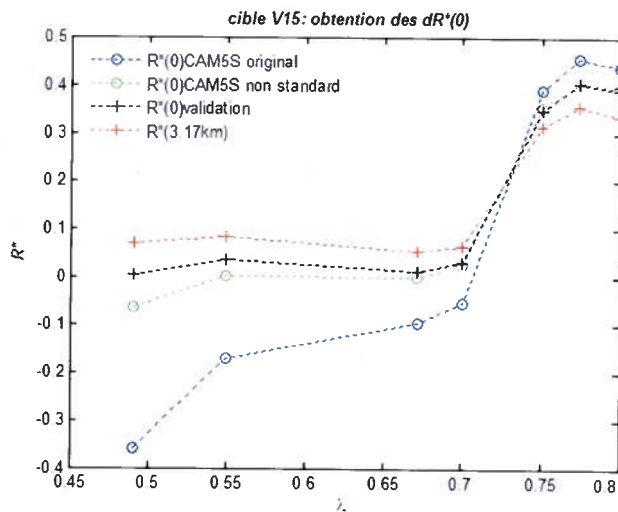


Illustration V: cible V15 et V16

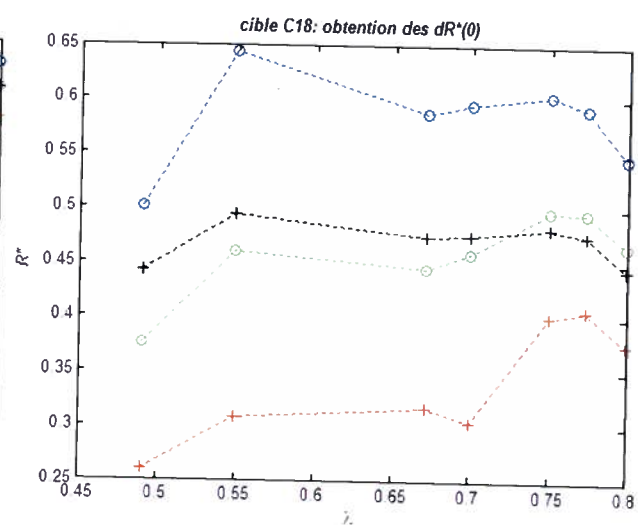
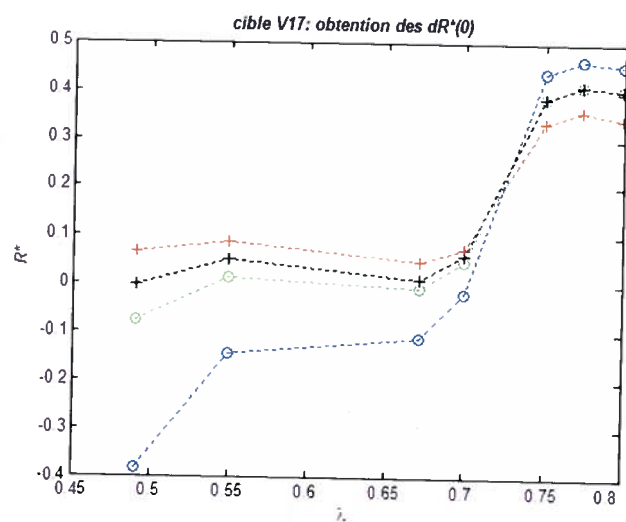


Illustration W: cible V17 et C18